

27.8
15R
2 21



ANALISIS PENGARUH PANJANG DATA TERHADAP KEANDALAN WADUK

TESIS

Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

Iskahar
NIM : L. 4A098023

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2002**

LEMBAR PENGESAHAN

JUDUL TESIS

**ANALISIS PENGARUH PANJANG DATA
TERHADAP KEANDALAN WADUK**

Diajukan oleh :

Nama : Iskahar
NIM : L. 4A098023


Telah disetujui oleh :

Pembimbing I



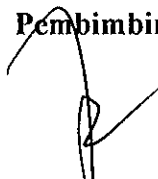
Ir. Sri Eko Wahyuni, MS.
NIP. 130898929

Pembimbing II



Ir. Sumbogo Pranoto, MS.
NIP. 131596963

Pembimbing Utama



Prof. Ir. Joetata Hadihardaja
NIP. 130237471

ANALISIS PENGARUH PANJANG DATA TERHADAP KEANDALAN WADUK

Disusun oleh :

Iskahar
N I M : L. 4A098023

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada tanggal :
22 April 2002

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik Sipil

Tim Penguji :

Ketua :

Prof. Ir. Joetata Hadihardaja

Anggota :

1. Ir. Sri Eko Wahyuni, MS.
2. Ir. Sumbogo Pranoto, MS.
3. Dr. Ir. Suripin, M.Eng.
4. Ir. Suharyanto, M.Sc.

Semarang, April 2002
Universitas Diponegoro
Program Pascasarjana
Magister Teknik Sipil



Dr. Ir. Suripin, M.Eng.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrochim

Puji syukur kehadiran Allah SWT., yang telah melimpahkan berkah dan rahmatNya, sehingga penyusunan tesis ini dapat selesai dengan baik.

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh Gelar Derajat Sarjana S-2 pada Magister Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang.

Penyusunan tesis ini dapat selesai berkat bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Ir. Eko Budiharjo, MSc. selaku Rektor Universitas Diponegoro.
2. Bapak Dr. Ir. Suripin, M.Eng. selaku Ketua Program Magister Teknik Sipil sekaligus anggota tim penguji yang banyak memberikan kemudahan dan kelancaran untuk terselesaikannya tesis ini.
3. Bapak Prof. Ir. Joetata Hadihardjaja selaku pembimbing utama yang telah memberikan dorongan semangat dan arahan.
4. Ibu Ir. Sri Eko Wahyuni, M.S. selaku pembimbing pertama yang banyak membimbing dan mengarahkan dalam penyusunan tesis ini.
5. Bapak Ir. Sumbogo Pranoto, M.S. selaku pembimbing kedua yang telah membimbing dan mendorong untuk terselesaikannya tesis ini.
6. Bapak Ir. Suharyanto, M.Sc. selaku anggota tim penguji yang banyak memberikan kritik dan masukan dalam tesis ini
7. Semua pihak yang membantu terselesaikannya tesis ini

Akhir kata penulis berharap semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Amien.

Semarang, April 2002

Penulis,

Iskahar

INTISARI

ISKAHAR (2002), Analisis Pengaruh Panjang Data terhadap Keandalan Waduk.

Air merupakan kebutuhan pokok bagi makhluk hidup di dunia. Pemanfaatan sumber daya air memerlukan suatu mekanisme pengaturan secara baik yang diikuti dengan pengawasan pelaksanaannya, sehingga air dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin bagi kesejahteraan manusia dengan menjaga kelestarian lingkungannya. Salah satu alternatif pengembangan sumber daya air yaitu dengan membangun waduk. Keandalan suatu waduk perlu ditinjau untuk mengetahui sejauh mana waduk tersebut dapat memenuhi kebutuhannya. Rangkaian data yang tersedia (data historis) pada suatu waduk, ada yang cukup panjang, namun ada juga yang relatif pendek. Menghadapi keadaan data yang sangat terbatas, maka diperlukan cara untuk memperoleh rekaman data yang lebih banyak jumlahnya, yaitu dengan menerapkan cara pembangkitan atau memperpanjang rekaman data historis, sehingga akan dapat digunakan dalam analisis perhitungan keandalan suatu waduk. Pada studi ini akan dibahas tentang pengaruh panjang data terhadap keandalan suatu waduk.

Untuk membangkitkan data dipakai metode stokastik Thomas Fiering. Kemudian data hasil bangkitan tersebut digunakan sebagai data *inflow* untuk menghitung nilai keandalan suatu waduk.. Metode yang digunakan untuk menganalisis keandalan waduk adalah metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould. Dalam penelitian ini penulis mengambil lokasi pada waduk Kedung Ombo Jawa Tengah.

Dalam analisis perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi, memberikan hasil nilai keandalan yang berbeda-beda pada setiap panjang data historis yang berbeda, sedangkan dengan metode matriks probabilitas Gould memberikan hasil nilai keandalan yang tidak jauh berbeda pada setiap panjang rangkaian data historis yang berbeda. Dari analisis diketahui pula bahwa perhitungan keandalan waduk antara metode simulasi dengan metode matriks probabilitas Gould diperoleh hasil yang berbeda.

Kata kunci : Analisis, keandalan, waduk, stokastik, inflow, debit, historis, bangkitan

SUMMARY

ISKAHAR (2002), Analysis of Effect of the Data Series Length to Reservoir Reliability.

Water is the principle demand of the creature on the world. The use of water resource needs a certain mechanism and control, so that the water can be used optimally for human prosperity without neglecting environment eternality. One of water resource development alternative is reservoir development. The reliability of the reservoir is analyzed in order to know how reliable is the reservoir fulfills its demand. Historical data series are available as a long term and short term data series. When the data is limited, generation of historical data series record are critical needed, to get longer data. The data then used as a parameter of reliability reservoir analysis. This study discusses the effect of the data series length to reservoir reliability.

To generate the data, Stochastic Thomas Fiering Method is used. Those data then used as inflow data to calculate reservoir reliability. The calculation is accomplished by Simulation Method and Gould's Probability Matrix Method. The method is implemented at Kedung Ombo Reservoir, Central Java.

The result show that reservoir reliability obtained from Simulation Method are different for different historical data length. While, those obtained from Gould's Probability Matrix Method are almost homogen for varian historical data length.

Key Words : Analysis, reliability, reservoir, stochastic, inflow, discharge, historic, generation.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
INTISARI	iv
SUMMARY	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xii
 BAB I. PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat yang diharapkan	2
1.4 Lingkup Studi dan Pembatasan Masalah	2
1.4.1 Lingkup Studi	2
1.4.2 Pembatasan Masalah	3
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	 5
2.1 Kapasitas Waduk	5
2.2 Kebutuhan Air	9
2.2.1 Kebutuhan Air untuk Pembangkit Listrik	9
2.2.2 Kebutuhan Air Irigasi	9
2.3 Data <i>Inflow</i>	12
2.3.1 Uji Homogenitas Data	12
2.3.2 Model Stokastik	14
2.3.3 Komponen Acak	15
2.3.4 Parameter Statistik	17

2.3.5 Distribusi Data	18
2.3.6 Pembangkitan Data	19
2.3.6.1 Model <i>Autoregressive</i>	19
2.3.6.2 Model <i>Moving Average</i>	20
2.3.6.3 Model <i>Autoregressive Moving Average</i>	20
2.3.6.4 Model <i>Autoregressive Integrated Moving Average</i> ...	21
2.3.6.5 Model Disagregasi	21
2.3.7 Validasi Model	24
2.4 Keandalan Waduk	26
2.4.1 Metode Simulasi	27
2.4.2 Metode Matriks Probabilitas	28
2.4.3 Metode Matriks Probabilitas Gould	31
BAB III. METODE PENELITIAN	32
3.1 Identifikasi Masalah	32
3.2 Data yang Diperlukan	33
3.3 Validitas Data	34
3.4 Pendekatan Masalah	34
3.4.1 Pembangkitan Data	34
3.4.2 Keandalan Waduk	35
3.5 Analisis Perhitungan	35
3.5.1 Pembangkitan Data	35
3.5.2 Menghitung Keandalan Waduk	38
3.5.2.1 Metode Simulasi	38
3.5.2.2 Metode Matriks Probabilitas Gould	40
BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Data Tersedia	44
4.2 Pembahasan	47
4.2.1 Data Inflow	47
4.2.2 Pembangkitan Data	48
4.2.2.1 Sifat Statistik Data	48

4.2.2.2 Uji Homogenitas Data	48
4.2.2.3 Distribusi Data	51
4.2.2.4 Perhitungan Pembangkitan Data	52
4.2.2.5 Validasi Data Hasil Bangkitan	54
4.2.3 Keandalan Waduk	59
4.2.3.1 Metode Simulasi	59
4.2.3.2 Metode Matriks Probabilitas Gould	61
 BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	 65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	65
 DAFTAR PUSTAKA	 66
LAMPIRAN	69

DAFTAR TABEL

Tabel	J u d u l	Halaman
3.1	Contoh susunan masing-masing zone	40
3.2	Contoh “ <i>tally sheet</i> “	41
3.3	Contoh “ <i>tally sheet</i> “ kegagalan	41
4.1	Hubungan antara elevasi, luas genangan dan kapasitas tampungan	44
4.2	Evaporasi rerata bulanan waduk Kedung Ombo	46
4.3	Kebutuhan air total dari waduk Kedung Ombo	47
4.4	Pengelompokan data 36 tahun pertama	49
4.5	Pengelompokan data 9 tahun kedua	49
4.6	Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara antara data debit historis dengan data debit hasil bangkitan 80 tahun (untuk data 10 tahun)	57
4.7	Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara antara data debit historis dengan data debit hasil bangkitan 80 tahun (untuk data 20 tahun)	57
4.8	Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara antara data debit historis dengan data debit hasil bangkitan 80 tahun (untuk data 30 tahun)	57
4.9	Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara antara data debit historis dengan data debit hasil bangkitan 80 tahun (untuk data 40 tahun)	58
4.10	Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara antara data debit historis dengan data debit hasil bangkitan 80 tahun (untuk data 45 tahun)	58
4.11	Rekapitulasi hasil perhitungan keandalan waduk Kedung Ombo	64

DAFTAR GAMBAR

<u>Gambar</u>	<u>J u d u l</u>	<u>Halaman</u>
1.1	Peta lokasi waduk Kedung Ombo dan DPS kali Serang	4
2.1	Diagram periode kritis menurut Mc. Mahon	6
3.1	Bagan alir langkah-langkah penelitian	32
3.2	Bagan alir perhitungan pembangkitan data	37
3.3	Bagan alir keandalan waduk dengan metode simulasi	39
3.4	Bagan alir keandalan waduk dengan metode matriks probabilitas Gould	43
4.1	Kurva karakteristik waduk Kedung Ombo	45

DAFTAR LAMPIRAN

<u>Lampiran</u>	<u>J u d u l</u>	<u>Halaman</u>
1	Debit rata-rata inflow waduk Kedung Ombo dan <i>Plotting Position</i> untuk distribusi data	70
2	<i>Listing</i> program pembangkitan data dan program keandalan waduk	73
3	Hasil perhitungan pembangkitan data, Hasil perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi dan matriks Probabilitas Gould, untuk data historis 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun, 45 tahun dan 47 tahun	101
4.	Tabel distribusi t dan distribusi F	157

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Notasi

$[P]_t$	Matriks probabilitas isi waduk pada tahun t
$[P]_{t+1}$	Matriks probabilitas isi waduk pada akhir tahun ke- t atau
$[T]$	Matriks transisi isi waduk
$f(t)$	fungsi frekwensi distribusi normal baku
ϕ_1, \dots, p	Koefisien autoregresi
α_1, \dots, q	Koefisien <i>moving average</i>
ε_t	variabel random berdistribusi normal
A	Luas daerah genangan
b_j	Koefisien regresi bulan ke- j
C	Kapasitas aktif atau manfaat waduk (m^3)
C_v	Koefisien variasi
d	Anggapan kedalaman tanah setelah penyiapan lahan (mm)
DK	Derajat kebebasan
D_t	Kebutuhan selama periode t (m^3 / bulan)
η	Efisiensi
E_o	Evaporasi air terbuka selama penyiapan lahan (mm/hari)
E_t	Evaporasi selama periode t (m^3 / bulan)
E_t	Evapotranspirasi (mm/hari)
E_{tc}	Evapotranspirasi tanaman (mm/hari)
E_{to}	Evapotranspirasi tanaman acuan (mm/hari)
F_1	Kehilangan air di sawah selama 1 hari (mm)
g	Koefisien asimetri data
g_j	Koefisien asimetri bulan j
H	Elevasi
H_{eff}	Tinggi terjun efektif (m)
IR	Kebutuhan air irigasi ditingkat persawahan (mm/hari)
I_r	Kebutuhan air untuk irigasi (mm/hari)
k	selang (lag)
K_c	Koefisien tanaman
γ	Koefisien kurtosis
L_t	Kehilangan air akibat bocoran dan rembesan selama periode t (m^3 / bulan)
M	Kebutuhan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang sudah dijenuhkan (mm/hari)
	Matriks probabilitas isi waduk pada awal tahun ke- $t+1$
n	Banyaknya data
n_1	Panjang data historis
n_2	Panjang data hasil bangkitan
μ	Nilai rerata populasi
N_p	Porositas tanah (%)
P	Daya listrik (KW)
$P(C)$	Fungsi probabilitas kapasitas waduk

$P(D)$	Fungsi probabilitas kebutuhan
$P(q)$	Fungsi probabilitas isi waduk ditambah aliran masuk
$P(t)$	Fungsi probabilitas waktu
$P(x)$	Fungsi probabilitas aliran masuk
P_d	Kedalaman genangan setelah penyiapan lahan (mm)
P_e	Tingkat kegagalan (%)
P_o	Perkolasi (mm/hari)
PWR	Kebutuhan air untuk penyiapan lahan (mm)
\bar{q}	Nilai rerata data debit tahunan
Q	Debit (m^3/dt)
q_i	Data debit hasil pembangkitan yang dicari (pada tahun ke-i)
q_{ij}	Data debit hasil pembangkitan yang dicari (pada tahun ke-i, bulan ke-j)
\bar{q}_j	Nilai rerata debit bulan ke-j
Q_t	Aliran masuk (inflow) selama periode t (m^3 / bulan)
R	Tingkat keandalan (%)
R_e	Curah hujan efektif (mm/hari)
r_j	Koefisien korelasi debit rerata bulan ke-j dengan bulan ke-j-1
r_k	Koefisien korelasi
$RS_{(setengah\ bulan)5}$	Curah hujan minimum tengah bulanan dengan periode ulang 5 tahun
S	Simpangan baku data
S_1	Simpangan baku data historis
S_2	Simpangan baku data hasil bangkitan
S_a	Derajat kejenuhan tanah setelah penyiapan lahan dimulai (%)
S_b	Derajat kejenuhan tanah sebelum penyiapan lahan dimulai (%)
σ	Simpangan baku populasi
S_j	Simpangan baku bulan ke-j
$Smaks$	Tampungan maksimum
$Smin$	Tampungan minimum
S_o	Kebutuhan air untuk pengolahan tanah atau penggenangan (mm/hari)
Sp	Statistik penguji
t	Periode waktu yang digunakan, biasanya 1 bulan
T	Jangka waktu penyiapan lahan (hari)
$t_{1...n}$	Bilangan acak berdistribusi mendekati normal
	Tampungan waduk pada awal periode $t+1$ (m^3 / bulan)
t_i	Nilai acak berdistribusi normal baku (pada tahun ke-i)
t_{ij}	Nilai acak berdistribusi normal baku (pada tahun ke-i, bulan ke-j)
$U_{1...n}$	Bilangan acak berdistribusi seragam
W	Volume tiap zone (m^3)
\bar{X}	Nilai rerata data
\bar{X}_1	Nilai rerata data historis
\bar{X}_2	Nilai rerata data hasil bangkitan
X_i	Nilai dari data
Y_t	Seri yang tergantung waktu, berdistribusi normal dengan rerata μ dan variasi σ^2
Z_{t+1}	Tampungan waduk pada akhir periode t (m^3 / bulan) atau
z	Jumlah zone

Z_i	Bilangan acak dengan nilai rerata μ dan simpangan baku σ
Z_t	Tampungan waduk pada awal periode t (m^3 /bulan)

Singkatan

AR	Autoregressive
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
ARMA	Autoregressive Moving Average
Cos	Cosinus
CP	Critical Period
Ditjen	Direktorat Jenderal
DPS	Daerah Pengaliran Sungai
DPU	Dinas Pekerjaan Umum
Exp	Eksponensial
FSL	<i>Full Supply Level</i> = Elevasi muka air penuh
KP	Kriteria Perencanaan
Log	Logaritma
m.a.	Muka Air
MA	Moving Average
MOL	<i>Minimum Operating level</i> = Elevasi muka air minimum
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
s/d	Sampai dengan
Sin	Sinus
US	United States

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan kebutuhan pokok bagi makhluk hidup di dunia. Pemanfaatan sumber daya air memerlukan suatu mekanisme pengaturan yang baik dan diikuti dengan pengawasan terhadap pelaksanaannya, sehingga air dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin bagi kesejahteraan manusia dengan selalu menjaga kelestarian lingkungannya. Salah satu alternatif pengembangan sumber daya air yaitu dengan membangun waduk. Waduk berfungsi untuk memantapkan aliran air, yaitu berupa pengaturan persediaan air yang bervariasi secara alami maupun dengan cara memenuhi kebutuhan yang berbeda-beda pada konsumen (Linsley, 1986). Waduk dapat berfungsi sebagai penampung air pada musim hujan dan sebagai sumber air pada musim kemarau. Keandalan suatu waduk perlu ditinjau untuk mengetahui sejauh mana waduk tersebut dapat memenuhi kebutuhannya.

Rangkaian data yang tersedia (data historis) pada suatu waduk, ada yang cukup panjang, namun ada juga yang relatif pendek. Data dikategorikan panjang apabila sampel data lebih dari 30 buah, sedangkan apabila sampel data kurang dari atau sama dengan 30 buah dikategorikan sebagai data pendek (Soewarno, 1995). Menghadapi keadaan data yang sangat terbatas, maka diperlukan cara untuk memperoleh rekaman data yang lebih banyak jumlahnya. Dengan menerapkan cara pembangkitan (*generating techniques*), maka akan diperoleh data deret berkala buatan (*artificially generating time series*) yaitu rangkaian data buatan yang diperoleh dengan cara memperpanjang rekaman data historis, sehingga akan dapat digunakan dalam analisis perhitungan keandalan suatu waduk. Panjang-pendeknya rangkaian data historis yang tersedia tentunya akan berpengaruh pada nilai keandalan suatu waduk. Pada studi ini akan dibahas tentang pengaruh panjang data terhadap keandalan waduk. Untuk membangkitkan data dipakai metode stokastik Thomas Fiering. Model stokastik Thomas Fiering dipilih untuk pembangkitan data karena merupakan model yang paling sederhana penggunaannya yang dapat berlaku untuk umum, secara implisit

model ini mengijinkan adanya ketakstasioneran dalam data aliran bulanan (Clarke, 1973). Untuk menganalisis keandalan waduk digunakan metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould.

Penelitian ini mengambil lokasi pada waduk Kedung Ombo yang terletak di Kabupaten Grobogan, Propinsi Jawa Tengah. Alasan memilih lokasi tersebut karena data historis yang tersedia pada waduk Kedung Ombo cukup panjang dan data-data lain yang mendukung cukup lengkap. Daerah genangan waduk Kedung Ombo meliputi 3 (tiga) wilayah Administrasi Kabupaten yaitu Kabupaten Grobogan, Kabupaten Boyolali, Kabupaten Sragen. Luas daerah pengaliran sungai (DPS) waduk adalah 614 km², yang sebagian besar luasnya dipengaruhi oleh DPS Kali Serang. Waduk Kedung Ombo merupakan waduk serbaguna (*multi purpose*) yang berfungsi sebagai waduk untuk penyediaan air irigasi, PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), penyediaan air baku untuk keperluan domestik (air bersih) dan air proses untuk keperluan industri (air industri).

1.2 Tujuan Penelitian

Studi ini dimaksudkan untuk mendapatkan gambaran tentang pengaruh panjang data terhadap nilai keandalan (*reliability*) pada waduk Kedung Ombo Jawa Tengah.

1.3 Manfaat yang diharapkan

Manfaat yang diharapkan dari studi ini adalah keterbatasan panjang data historis dapat diperpanjang dengan metode pembangkitan data stokastik Thomas Fiering yang selanjutnya dapat dipergunakan sebagai data *inflow* dalam menganalisis keandalan suatu waduk.

1.4 Lingkup Studi dan Pembatasan Masalah

1.4.1 Lingkup Studi

Dalam studi ini lingkup yang akan dibahas meliputi:

- a. Membangkitkan data dengan menggunakan metode stokastik Thomas Fiering.

- b. Menghitung nilai Keandalan waduk dengan membuat program hitungan keandalan waduk dengan metode simulasi dan matriks probabilitas Gould.
- c. Membandingkan nilai keandalan waduk yang diperoleh dari pembangkitan data untuk masing-masing jumlah panjang data yang berbeda.

1.4.2 Pembatasan Masalah

Beberapa pembatasan permasalahan terhadap studi ini adalah :

- a. Data debit historis bulanan yang akan dibangkitkan adalah panjang data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun, kemudian berdasarkan masing-masing kelompok panjang data tersebut dibangkitkan selama 80 tahun.
- b. Data evaporasi yang digunakan adalah data evaporasi rerata bulanan.
- c. Rangkaian debit bulanan yang digunakan untuk menghitung keandalan waduk merupakan debit hasil bangkitan selama 80 tahun (dipakai 50 tahun yang terakhir) dan debit historis selama 47 tahun.
- d. Kehilangan air akibat rembesan tidak diperhitungkan.
- e. Dalam menganalisis keandalan waduk, pola operasi tidak diperhitungkan.
- f. Data kebutuhan yang digunakan adalah kebutuhan riil (irigasi, listrik dan air baku) dari waduk.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kapasitas Waduk

Tampungan waduk secara umum dibagi dalam tiga bagian, yaitu : tampungan mati (*dead storage*) yang dialokasikan untuk tampungan sedimen, tampungan aktif (*active storage*) dialokasikan untuk tujuan konservasi dan tampungan tambahan untuk pengendalian banjir (*flood control storage*). Dalam penentuan kapasitas waduk ada 3 (tiga) hal yang perlu mendapat perhatian, yaitu : variasi *inflow*, besarnya kebutuhan dan tingkat keandalan yang diinginkan (Mc. Mahon, 1978).

Kapasitas waduk yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan tertentu tergantung pada 3 faktor, yaitu (Mc. Mahon, 1978) :

1. Variasi aliran sungai (*inflow*)
2. Besarnya tingkat kebutuhan
3. Tingkat keandalan yang diinginkan

Keandalan didefinisikan sebagai besarnya peluang bahwa waduk akan mampu memenuhi kebutuhan yang direncanakan sepanjang masa operasinya tanpa adanya kekurangan (Linsley, 1986).

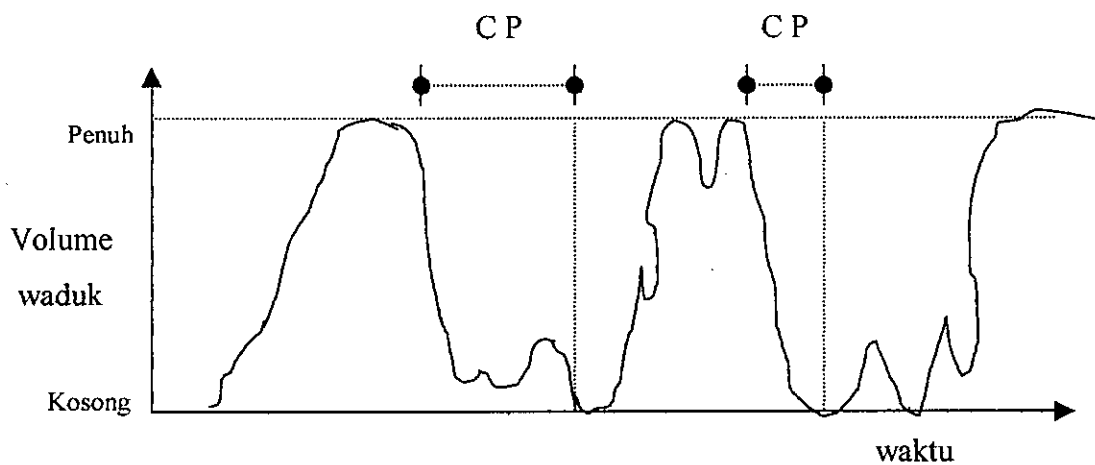
Analisis tampungan waduk dapat dihitung dengan bermacam-macam metode, baik yang sederhana maupun yang kompleks. Menurut Mc. Mahon analisis tampungan untuk waduk dikelompokkan menjadi 3 (tiga) kelompok utama, yaitu :

1. Metode periode kritik
2. Metode Moran dan kawan-kawan
3. Metode pembangkitan data stokastik

Meskipun telah dibuat pengelompokan seperti tersebut di atas, tetapi perbedaan antar masing-masing kelompok tidak begitu jelas sehingga dimungkinkan untuk mengelompokkan metode-metode yang ada dengan cara yang berbeda tergantung maksud dan kegunaannya.

Periode kritik didefinisikan sebagai periode yang dimulai pada saat waduk penuh sampai batas minimum operasi (MOL = Minimum Operating Level) yang

pertama kali, tanpa adanya limpasan selama periode itu, sedangkan *U.S. Army Corps Of Engineers* mendefinisikan periode kritis sebagai periode antara kondisi waduk penuh ke kondisi batas minimum operasi (MOL = Minimum Operating Level), kemudian ke kondisi penuh lagi, yang disebut “*The Critical Drawdown Period*”. Periode kritis menurut Mc. Mahon, yaitu periode yang dimulai dari kondisi saat waduk penuh dan berakhir saat batas minimum operasi (MOL = Minimum Operating Level) yang pertama kali (Mc. Mahon dan Mein, 1978), seperti disajikan dalam Gambar 2.1 di mana terjadi dua kali periode kritis, yaitu sebagai berikut :



Keterangan : C P = Periode kritis (*Critical Period*)

Gambar 2.1 Diagram periode kritis menurut Mc. Mahon

Pada metode periode kritis kapasitas waduk yang dibutuhkan ditentukan berdasarkan pada selisih antara pemakaian air dari waduk yang mula-mula penuh dengan aliran masuk pada saat-saat aliran minimum. Yang termasuk kedalam periode kritis adalah Metode Ripple, Simulasi, Dincer, Gould gamma.

Metode Moran dan kawan-kawan didasarkan pada teori yang dikemukakan oleh Moran yang mengemukakan hubungan persamaan sebagai berikut (Mc. Mahon dan Mein, 1978):

$$P(q) = P(x), P(D), P(t), P(C) \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan,

$P(q)$ = Fungsi probabilitas isi waduk ditambah aliran masuk,

$P(x)$ = Fungsi probabilitas aliran masuk,

$P(D)$ = Fungsi probabilitas kebutuhan,

$P(t)$ = Fungsi probabilitas waktu,

$P(C)$ = Fungsi probabilitas kapasitas waduk.

Konsep tersebut diterapkan pada waduk dengan 3 pendekatan yang berbeda, yaitu :

- a. Waktu dan volume dianggap sebagai variabel menerus,
- b. Waktu dianggap sebagai variabel terputus, sedangkan volume sebagai variabel menerus,
- c. Waktu dan volume dianggap sebagai variabel terputus.

Metode pembangkitan data stokastik pada dasarnya sama dengan metode periode kritik maupun metode Moran, hanya perbedaannya adalah menggunakan rangkaian data masukan (*inflow*) ke waduk dari hasil pembangkitan data stokastik dengan sifat statistik yang diturunkan dari data historis.

Metode Rippl, dalam menghitung kapasitas waduk agar memenuhi kebutuhan pengambilan pada musim kering, menggunakan data debit *inflow* yang tercatat. Data debit *inflow* tersebut digambar dalam kurva masa debit (diagram Rippl), yaitu merupakan penjumlahan kumulatif data debit *inflow* ke waduk (Sudjarwadi, 1989). Kelemahan metode ini adalah : menganggap bahwa waduk akan berada pada kondisi penuh saat permulaan musim kering (periode kering), evaporasi tidak diperhitungkan, belum bisa untuk menghitung keandalan waduk, untuk menghitung kapasitas tampungan hanya digunakan data debit *inflow* yang tercatat sehingga hasilnya masih kasar. Kelebihannya, dengan rangkaian data debit *inflow* yang relatif pendek masih dapat digunakan untuk menghitung kapasitas tampungan waduk (Sudjarwadi, 1989) Metode ini cocok digunakan untuk analisis awal dalam menentukan kapasitas tampungan waduk.

Metode Dincer dalam menghitung kapasitas tampungan waduk menggunakan asumsi dasar periode kritik bahwa waduk mula-mula penuh dan hanya satu kali gagal selama periode itu. Kelemahan dari metode ini adalah : data yang digunakan data debit rerata tahunan, asumsi bahwa waduk mula-mula penuh dan hanya satu kali

gagal selama periode itu, debit tahunan berdistribusi normal, kebutuhan tetap dan evaporasi diabaikan. Kelebihannya, asumsi bahwa debit tahunan independen adalah mendekati kenyataan dan dapat digunakan untuk menghitung keandalan waduk. (Sudjarwadi, 1989)

Metode Gould Gamma, merupakan modifikasi dari metode Dincer. Kelemahan metode ini adalah : keadaan awal waduk dianggap penuh, data yang digunakan data debit rerata tahunan, kebutuhan tetap dan evaporasi diabaikan. Kelebihan dari metode Gould Gamma adalah dapat digunakan untuk menghitung keandalan waduk, debit tahunan dianggap berdistribusi gamma dan independen. Karena kenyataan bahwa debit tahunan biasanya berdistribusi gamma dan independen. (Sudjarwadi, 1989)

Dalam studi ini untuk menghitung keandalan waduk dipergunakan metode matriks Probabilitas Gould dan metode simulasi. Metode Matriks Probabilitas Gould dipergunakan karena hampir semua faktor yang mempengaruhi tampungan waduk diperhitungkan (yaitu : debit *inflow*, kebutuhan dan evaporasi), kebutuhan bervariasi, dapat digunakan data debit bulanan, untuk menghitung keandalan kapasitas waduk digunakan keadaan awal yang berbeda-beda sehingga lebih mendekati kenyataan (Sudjarwadi, 1989). Metode matriks probabilitas Gould dianjurkan pemakaiannya untuk analisis perancangan akhir kapasitas tampungan waduk (Seyhan, 1979). Namun metode ini memiliki sedikit kelemahan, yaitu dalam menghitung tampungan, waduk dibagi dalam beberapa bagian (zone / diskrit), kenyataan bahwa aliran yang terjadi pada waduk adalah kontinyu. Dengan kelemahan yang ada tersebut dicoba dibandingkan dengan metode simulasi yang memiliki beberapa kelebihan yaitu : perhitungan tampungan waduk dilakukan secara kontinyu, mencerminkan perilaku sebenarnya dari waduk yang memperhitungkan semua faktor yang mempengaruhi tampungan waduk (yaitu : debit *inflow*, kebutuhan dan evaporasi), kebutuhan bervariasi, dapat digunakan data debit bulanan. Namun dalam metode simulasi ini juga terdapat kelemahan yaitu keadaan awal waduk dianggap penuh. (Sudjarwadi, 1989).

2.2 Kebutuhan Air

2.2.1 Kebutuhan Air untuk Pembangkit Listrik

Kebutuhan air untuk PLTA didasarkan pada kapasitas tenaga listrik rencana. Penentuan kapasitas tenaga listrik rencana tergantung pada ketersediaan air untuk memutar turbinnya, sedangkan daya yang tersedia pada suatu waduk dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P = 9,8 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan,

P = Daya listrik (KW)

η = Efisiensi

Q = Debit (m^3/dt)

H_{eff} = Tinggi terjun efektif (m)

2.2.2 Kebutuhan Air Irigasi

Menurut kriteria perencanaan jaringan irigasi (KP 01 tahun 1986) kebutuhan air irigasi ditentukan oleh kebutuhan air di sawah dan efisiensi irigasi total, sedangkan kebutuhan air di sawah tergantung pada faktor-faktor di bawah ini :

1. Penyiapan lahan
2. Penggunaan komsumtif (*comsumptive use*)
3. Perkolasi dan rembesan
4. Penggantian lapisan air
5. Curah hujan efektif

- Penyiapan lahan

Besarnya kebutuhan air untuk penyiapan lahan merupakan faktor yang menentukan kebutuhan air irigasi secara keseluruhan. Faktor-faktor penting yang menentukan besarnya kebutuhan air bagi penyiapan lahan adalah :

- a. Lama Penyiapan lahan,
- b. Jumlah air yang diperlukan untuk penyiapan lahan

Lama penyiapan lahan antara lain tergantung pada ketersediaan tenaga dan peralatan kerja. Ada kemungkinan pembibitan tidak dilakukan secara serentak

karena luasnya lahan. Jadi mungkin pada beberapa bagian petak tersier sudah dilakukan pembibitan 3-4 minggu lebih awal dibandingkan bagian lain. Porositas tanah disawah merupakan faktor yang paling penting untuk menentukan besarnya kebutuhan air bagi penyiapan lahan. Untuk menentukan besarnya kebutuhan air bagi penyiapan lahan dipergunakan rumus sebagai berikut :

$$PWR = \frac{(Sa - Sb).Np.d}{10^4} + Pd + F1 \dots \dots \dots (2.3)$$

Dengan,

PWR = Kebutuhan air untuk penyiapan lahan (mm)

Sa = Derajat kejenuhan tanah setelah penyiapan lahan dimulai (%)

Sb = Derajat kejenuhan tanah sebelum penyiapan lahan dimulai (%)

Np = Porositas tanah, dalam % pada harga rerata untuk kedalaman tanah.

d = Anggapan kedalaman tanah setelah penyiapan lahan (mm)

Pd = Kedalaman genangan setelah penyiapan lahan (mm)

F1 = Kehilangan air di sawah selama 1 hari (mm)

Sebagai nilai perkiraan untuk tanah lempung tanpa retak-retak maka kebutuhan air untuk penyiapan lahan kurang lebih 200 mm. Setelah pembibitan selesai lapisan air harus ditambah 50 mm, sehingga kebutuhan untuk penyiapan lahan seluruhnya sebesar 250 mm.

Untuk perhitungan kebutuhan irigasi selama penyiapan lahan, dapat digunakan metode yang dikembangkan oleh Van de Goor dan Zijlstra (KP 01 tahun 1986). Metode tersebut didasarkan pada laju air konstan dalam lt/dt, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$IR = M e^k / (e^k - 1) \dots \dots \dots (2.4)$$

Dengan,

IR = Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan (mm/hari)

M = Kebutuhan air untuk mengganti kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang sudah dijenuhkan, $M = E_o + P_o$ (mm/hari)

E_o = Evaporasi air terbuka selama penyiapan lahan, $E_o = 1,1 \cdot E_{to}$ (mm/hari)

P_o = Perkolasi (mm/hari)

$k = M \cdot T / S$, dengan T adalah Jangka waktu penyiapan lahan (hari) dan S adalah Kebutuhan air, untuk penjenruhan ditambah dengan lapisan air 50 mm, yaitu $200 + 50 = 250$ mm, seperti dijelaskan di atas.

- Penggunaan komsuntif

Penggunaan komsuntif adalah jumlah air yang digunakan tanaman untuk proses fotosintesis dari tanaman tersebut, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Etc = Kc \cdot Eto \dots\dots\dots (2.5)$$

Dengan,

Etc = Evapotranspirasi tanaman (mm/hari)

Eto = Evapotranspirasi tanaman acuan (mm/hari)

Kc = Koefisien tanaman

- Perkolasi

Laju perkolasi sangat tergantung pada sifat-sifat tanah. Pada tanah lempung berat dengan karakteristik pengolahan (*pudding*) yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1 – 3 mm/hari (KP 01 tahun 1986). Pada tanah-tanah yang lebih ringan laju perkolasi bisa lebih tinggi. Untuk menentukan laju perkolasi, tinggi muka air tanah dan perembesan yang terjadi akibat meresapnya air melalui tanggul sawah juga harus diperhitungkan.

- Penggantian lapisan air

Penggantian lapisan air dilakukan setelah pemupukan, sesuai kebutuhan. Jika tidak ada penjadwalan, maka dapat dilakukan penggantian sebanyak 2 kali, yaitu masing-masing 50 mm (atau 3,3 mm/hari selama setengah bulan) selama sebulan dan dua bulan setelah transplantasi.

- Curah hujan efektif

Untuk irigasi padi, curah hujan efektif bulanan diambil 70 % dari curah hujan minimum tengah bulanan dengan periode ulang 5 tahun

$$Re = 0,7 \times \frac{1}{15} \cdot Rs \text{ (setengah bulan)}_5 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan,

Re = Curah hujan efektif (mm/hari)

Rs (setengah bulan)₅ = Curah hujan minimum tengah bulanan dengan periode ulang 5 tahun atau *1 in 5 dry* (mm)

Kebutuhan air untuk tanaman tergantung pada jenis tanaman dan masa pertumbuhannya sampai di panen, sehingga memberikan produksi yang optimum. Perkiraan banyaknya air untuk irigasi didasarkan pada faktor-faktor jenis tanaman, jenis tanah, cara pemberian air, cara pengelolaan tanah, banyaknya turun hujan, waktu penanaman, iklim, pemeliharaan saluran / bangunan dan eksploitasi. Banyaknya air untuk irigasi pada petak sawah dirumuskan sebagai berikut :

$$Ir = S + Et + P - Re \dots\dots\dots(2.7)$$

Dengan,

Ir = Kebutuhan air untuk irigasi (mm/hari)

So = Kebutuhan air untuk pengolahan tanah atau penggenangan (mm/hari)

Et = Evapotranspirasi (mm/hari)

Po = Perkolasi (mm/hari)

Re = Curah hujan efektif (mm/hari)

2.3 Data Inflow

Data *inflow* yang dipergunakan adalah data debit historis bulanan waduk Kedung Ombo selama 47 tahun dan data hasil pembangkitan selama 80 tahun, diambil 50 tahun yang terakhir (dari data historis 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun). Metode pembangkitan data yang dipergunakan adalah metode stokastik Thomas Fiering.

2.3.1 Uji Homogenitas Data

Data deret berkala (data historis) sebelum dipergunakan untuk analisis lanjutan harus dilakukan uji homogenitas, untuk menguji keseragaman / kestabilan harga rata-rata dan simpangan baku dari deret berkala tersebut. Langkah-langkah yang dilakukan pada uji homogenitas adalah sebagai berikut :

- Data deret berkala dibagi menjadi dua kelompok.

- Menghitung harga simpangan baku kedua kelompok data, dengan rumus :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_1)^2 + \sum (X_j - \bar{X}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2}} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan,

S = Simpangan baku data

X_i = Data kelompok I

X_j = Data kelompok II

\bar{X}_1 = Nilai rerata data kelompok I

\bar{X}_2 = Nilai rerata data kelompok II

N_1 = Panjang data kelompok I

N_2 = Panjang data kelompok II

- Menguji keseragaman / kestabilan harga rata-rata dan simpangan baku terhadap kedua kelompok data tersebut, yaitu sebagai berikut :

a. Pengujian berdasarkan pada harga rata-rata

$$t_c = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S \sqrt{\frac{(N_1 + N_2)}{N_1 \cdot N_2}}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Dengan,

t_c = Statistik penguji

S = Simpangan baku data

\bar{X}_1 = Nilai rerata data kelompok I

\bar{X}_2 = Nilai rerata data kelompok II

N_1 = Panjang data kelompok I

N_2 = Panjang data kelompok II

Selanjutnya ditentukan t tabel yang diperoleh dari tabel student t (lihat lampiran 4) dengan tingkat kepercayaan $(1-\alpha)$ dengan $\alpha = 5 \%$ dan derajat kebebasan (N_1+N_2-2) , yaitu $t_{(1-\alpha) (N_1+N_2-2)}$.

Data homogen (seragam) pada harga rata-rata apabila $t_c < t_{(1-\alpha) (N_1+N_2-2)}$.

b. Pengujian berdasarkan pada harga simpangan baku (standar deviasi)

$$t_c = \frac{|S_1 - S_2|}{S \sqrt{\frac{(N_1 + N_2)}{N_1 \cdot N_2}}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan,

t_c = Statistik penguji

S = Simpangan baku data

S_1 = Simpangan baku data kelompok I

S_2 = Simpangan baku data kelompok II

N_1 = Panjang data kelompok I

N_2 = Panjang data kelompok II

Selanjutnya ditentukan t tabel yang diperoleh dari tabel student t (lihat lampiran 4) dengan tingkat kepercayaan $(1-\alpha)$ dengan $\alpha = 5 \%$ dan derajat kebebasan (N_1+N_2-2) , yaitu $t_{(1-\alpha) (N_1+N_2-2)}$.

Data homogen pada harga simpangan baku apabila $t_c < t_{(1-\alpha) (N_1+N_2-2)}$.

2.3.2 Model Stokastik

Salah satu masalah yang dihadapi oleh para ahli hidrologi, termasuk di Indonesia adalah kekurangan / keterbatasan panjang data. Dengan keadaan data yang sangat terbatas, maka diperlukan cara untuk memperoleh catatan data yang lebih panjang jumlahnya. Dengan menerapkan cara pembangkitan (*generating Techniques*), maka akan diperoleh data deret berkala buatan, yang bertujuan untuk memperpanjang rekaman data sehingga mempunyai beberapa alternatif rangkaian data.

Menurut Moran untuk membangkitkan (*to generate*) suatu urutan nilai (*sequence of values*) dari data debit historis suatu sungai, kita tinjau aliran-aliran yang merupakan hasil dari proses acak (*random process*), yaitu suatu proses yang hasilnya berubah menurut waktu dengan cara memasukkan faktor probabilitas (Soemarto, 1986).

Deret berkala sembarang dapat mengandung beberapa unsur, yaitu : trend, periodik dan stokastik. Komponen trend dan periodik mempunyai sifat pasti

(*deterministic*), karena tidak tergantung waktu. Komponen stokastik (*stochastic*) mempunyai sifat stasioner dan tergantung waktu. Rangkaian data disebut stasioner apabila nilai dari parameter statistiknya (rata-rata dan varian) relatif tidak berubah, sedangkan apabila salah satu parameter statistiknya berubah untuk setiap bagian rangkaian data tersebut, maka rangkaian data itu disebut tidak stasioner. Deret berkala tidak stasioner menunjukkan bahwa datanya tidak homogen.

Metode stokastik yang digunakan untuk membangkitkan rangkaian data debit buatan umumnya hasilnya akan memuaskan apabila pertambahan waktunya secara tahunan atau bulanan.

2.3.3 Komponen Acak

Suatu rangkaian data debit historis atau sintetik dari suatu sungai merupakan urutan angka-angka atau nilai-nilai yang dihasilkan oleh proses acak (*random process*) dalam urutan interval waktu secara bergantian, di mana urutan tersebut dinamakan deret waktu (*time series*), yang ditulis dengan X_i yaitu merupakan penjumlahan dua komponen, yaitu :

$$X_i = d_i + e_i \dots\dots\dots(2.11)$$

Dengan,

d_i = Komponen deterministik, yaitu suatu angka yang ditentukan oleh suatu fungsi eksak, yang dibentuk oleh parameter-parameter dan nilai-nilai terdahulu (*previous value*) dari proses, yang dapat berupa fungsi dari nilai tengah debit, keragaman aliran yang diukur dari simpangan bakunya dan dari debit-debit masa lalu (historis).

e_i = Komponen acak dari model, yang merupakan angka acak yang diambil dari himpunan angka-angka acak yang mempunyai distribusi atau pola probabilitas tertentu.

Angka-angka acak yang dihasilkan secara matematis, seperti oleh komputer, sebenarnya bukan nilai acak murni, melainkan nilai acak semu (*pseudo random*) yang merupakan urutan angka-angka yang disusun secara deterministik dan teliti, dengan mempertahankan sifat-sifat sebenarnya dari urutan acak tersebut. Generasi-generasi dasar angka acak yang tidak sebenarnya (semu) menghasilkan angka-

angka acak berdistribusi merata (seragam). Angka-angka yang mengikuti distribusi lain dapat digenerasi dari angka acak dengan distribusi seragam.

Pada suatu kasus mungkin proses acak (e_i) dapat digambarkan berdistribusi merata (*uniform distribution*) dengan (0,1), artinya dalam distribusi ini masing-masing angka antara 0 dan 1 mempunyai kemungkinan muncul yang sama. Pada kasus lain proses acak digambarkan berdistribusi normal (*normal distribution*) yang berbentuk seperti genta (lonceng).

Cara untuk menghasilkan bilangan acak dengan distribusi normal. Misalkan untuk menghasilkan bilangan acak dengan rerata 0 dan simpangan baku 1, yang disebut distribusi normal baku, fungsi frekwensinya adalah (Reddy, 1987) :

$$f(t) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-1/2 t^2) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dengan,

π = Nilai konstan (ϕ) ≈ 3.1416

\exp = Nilai tetapan (eksponensial) ≈ 2.7183

t = Variabel

Teori batas pusat (*the central limit theorem*) dari teori probabilitas menyatakan bilangan-bilangan yang dibentuk dengan mengambil jumlah bilangan-bilangan acak dengan distribusi seragam atau dengan distribusi lain adalah mendekati distribusi normal, apabila terdapat cukup banyak bilangan yang berbeda dalam setiap jumlahnya, biasanya 12 sudah dianggap cukup. Jika U_1, U_2, U_3, \dots merupakan urutan bilangan acak dengan distribusi seragam, maka dirumuskan :

$$t_1 = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_{12} - 6 \dots\dots\dots(2.13)$$

$$t_2 = U_{13} + U_{14} + U_{15} + \dots + U_{24} - 6 \dots\dots\dots(2.14)$$

t_i merupakan bilangan acak yang akan mendekati distribusi normal dengan nilai rerata 0 dan simpangan baku 1. Angka 6 diperlukan untuk memberikan nilai rerata nol (Reddy, 1987).

Box dan Muller mengemukakan bahwa bila U_1 dan U_2 adalah dua bilangan random yang berdistribusi seragam, yang terletak antara 0 dan 1 dapat diubah

menjadi dua bilangan random berdistribusi normal dengan nilai rerata = 0 dan simpangan baku =1, yang dirumuskan (Reddy, 1987) :

$$t_1 = [-2 \ln (1 - U_1)]^{1/2} \cdot \cos (2\pi U_2) \dots\dots\dots (2.15)$$

$$t_2 = [-2 \ln (1 - U_1)]^{1/2} \cdot \sin (2\pi U_2) \dots\dots\dots (2.16)$$

Jadi untuk menghasilkan bilangan random berdistribusi normal diambil dari sepasang bilangan random berdistribusi seragam.

Untuk membentuk bilangan-bilangan acak berdistribusi lain, misalnya normal umum, dapat digunakan rumus :

$$Z_i = \mu + \sigma t_i \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan,

Z_i = Bilangan-bilangan acak dari distribusi yang sama (misalnya normal) dengan nilai rerata μ dan simpangan baku σ .

μ = Nilai rerata populasi

σ = Simpangan baku populasi

t_i = nilai acak berdistribusi normal baku (nilai rerata = 0 dan simpangan baku =1)

2.3.4 Parameter Statistik

Parameter statistik sesungguhnya hanya dapat dihitung dengan populasi, jadi tidak mungkin dihitung dengan data historis atau sampel. Suatu data historis hanyalah merupakan contoh pendek dari total rangkaian keseluruhan populasinya., sehingga untuk nilai rerata μ dari populasi didekati dengan menaksir nilai rerata \bar{X} dari sampel. Untuk suatu distribusi normal $N(\mu, \sigma^2)$, yang mempunyai nilai rerata μ dan keragaman σ^2 didekati dengan distribusi $N(\bar{X}, S^2)$. Nilai rerata matematis dapat dihitung dengan rumus :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots (2.18)$$

Simpangan baku data dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \dots\dots\dots (2.19)$$

Koefisien korelasi runtun – k data dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} X_i \cdot X_{i+k} - \frac{1}{(n-k)^2} \left(\sum_{i=1}^{n-k} X_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-k} X_{i+k} \right)}{\left[\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} X_i^2 - \frac{1}{(n-k)^2} \left(\sum_{i=1}^{n-k} X_i \right)^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} X_{i+k}^2 - \frac{1}{(n-k)^2} \left(\sum_{i=1}^{n-k} X_{i+k} \right)^2 \right]^{1/2}} \dots\dots\dots (2.20)$$

Sedangkan koefisien asimetri dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$g = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{S^3} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dengan,

\bar{X} = Nilai rerata data

n = Banyaknya data

X_i = Nilai dari data

S = Simpangan baku data

r_k = Koefisien korelasi

k = Selang, dalam hal ini harga k=1

g = Koefisien asimetri data

2.3.5 Distribusi Data

Distribusi normal merupakan distribusi utama yang digunakan secara luas didalam perhitungan statistik. Pengujian untuk menetapkan apakah rangkaian data historis berdistribusi normal dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain uji normalitas Liliefors atau uji chi kuadrat, sedangkan cara yang relatif mudah adalah dengan memplot data dalam kertas probabilitas normal. Nilai acak yang berdistribusi normal *plotting*-nya dalam kertas probabilitas akan merupakan garis lurus dengan batas penyimpangan tertentu (Zanzawi S.,1986). Uji normalitas dapat

pula digunakan dengan menghitung koefisien asimetrinya (g), yang nilainya berkisar dari - 0.3 sampai dengan + 0.3. Populasi rangkaian aliran tidak akan mungkin tepat berdistribusi normal. Namun meskipun demikian masih dapat ditentukan bila dibandingkan dengan distribusi lain.

Distribusi yang juga digunakan secara luas adalah distribusi log normal, baik parameter dua maupun tiga. Bila logaritma datanya berdistribusi normal, maka dapat ditentukan rangkaian tersebut berdistribusi log normal. Secara mudah dapat pula pengujian distribusi log normal dilakukan dengan memplot data historis pada kertas probabilitas log normal.

Distribusi Gamma merupakan distribusi ketiga yang banyak digunakan dalam pembangkitan data aliran. Bila data historis menunjukkan kecondongan yang berbeda dari kedua distribusi yang di atas, maka dapat dimasukkan kedalam distribusi gamma atau sering disebut juga distribusi Pearson Tipe III.

2.3.6 Pembangkitan Data

Secara umum akan dijelaskan dengan ringkas tentang model pembangkitan deret berkala dalam hidrologi stokastik. Model stokastik yang dikenal dan sering dipergunakan, antara lain (Salas et al, 1980), yaitu :

1. Model *Autoregressive* (Model AR)
2. Model *Moving Average* (Model MA)
3. Model *Autoregressive Moving Average* (Model ARMA)
4. Model *Autoregressive Integrated Moving Average* (Model ARIMA)
5. Model Disagregasi, dll.

2.3.6.1 Model *Autoregressive*

Model *autoregressive* pada orde p atau AR (p) secara umum dirumuskan sebagai berikut :

$$Y_t = \mu + \phi_1 (Y_{t-1} - \mu) + \dots + \phi_p (Y_{t-p} - \mu) + \varepsilon_t \dots\dots\dots(2.22)$$

Dengan ,

Y_t = Seri yang tergantung waktu, yang berdistribusi normal dengan rerata μ dan variasi σ^2

ε_t = Variabel random, berdistribusi normal dengan rerata nol dan variasi σ_ε^2

μ = Nilai rerata

ϕ_1, \dots, p = Koefisien autoregresi

2.3.6.2 Model *Moving Average*

Model *moving average* pada orde q atau MA (q) secara umum dirumuskan sebagai berikut :

$$Y_t = \mu + \varepsilon_t + \alpha_1 \cdot \varepsilon_{t-1} + \dots + \alpha_q \cdot \varepsilon_{t-q} \dots \dots \dots (2.23)$$

Dengan ,

Y_t = Seri yang tergantung waktu, yang berdistribusi normal dengan rerata μ dan variasi σ^2

ε_t = Variabel random, berdistribusi normal dan independen

μ = Nilai rerata

α_1, \dots, q = Koefisien *moving average*

2.3.6.3 Model *Autoregressive Moving Average*

Model *autoregressive Moving Average* pada orde (p, q) atau ARMA (p, q) merupakan kombinasi antara model AR pada orde p dan MA pada orde q yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Z_t = Y_t - \mu \dots \dots \dots (2.24)$$

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \dots + \phi_p Z_{t-p} - \mu + \varepsilon_t - \alpha_1 \cdot \varepsilon_{t-1} \dots - \alpha_q \cdot \varepsilon_{t-q} \dots \dots \dots (2.25)$$

Dengan ,

Y_t = Seri yang tergantung waktu, yang berdistribusi normal dengan rerata μ dan variasi σ^2

ε_t = Variabel random, berdistribusi normal dan independen

μ = Nilai rerata

ϕ_1, \dots, ϕ_p = Koefisien Autoregresi

$\alpha_1, \dots, \alpha_q$ = Koefisien *Moving Average*

2.3.6.4 Model *Autoregressive Integrated Moving Average*

Model *Autoregressive Integrated Moving Average* atau Model ARIMA (p,d,q) secara sederhana dirumuskan sebagai berikut :

$$U_t - \sum_{j=1}^p \phi_j \cdot U_{t-j} - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j}, \theta_0 = -1 \dots \dots \dots (2.26)$$

Dengan,

U_t = Perbedaan ke - d dari X_t proses.

ϕ_j, θ_j = Parameter-parameter

ε_t = Bilangan random

Untuk contoh ARIMA (1,1,1) dirumuskan :

$$U_t = \phi_1 U_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} \dots \dots \dots (2.27)$$

$$U_t = X_t - X_{t-1} \dots \dots \dots (2.28)$$

2.3.6.5 Model Disagregasi

Model disagregasi atau metode pemisahan, yaitu datanya dibangkitkan (misalnya tahunan) dan dipisah-pisah dalam satuan waktu yang lebih kecil. Pada prinsipnya diambil dari bentuk model dependen linier, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Y = AX + B\varepsilon \dots \dots \dots (2.29)$$

Dengan,

Y = Aliran observasi dari seri yang dibangkitkan (sub seri atau dependen seri)
yang tergantung pada harga aliran seri - X (seri kunci atau seri independen)

ε = Harga aliran dari seri random komplit (stokastik)

A, B = Parameter-parameter

Model *autoregressive* telah digunakan dalam hidrologi dan sumber daya air sejak tahun 1960 untuk pemodelan tahunan dan periodik dalam hidrologi *time*

series. Model *autoregressive* secara umum dikemukakan oleh Thomas dan Fiering tahun 1962, Yevjevich tahun 1963, serta Box dan Jenkins tahun 1970. Aplikasi model *autoregressive* menarik karena (Salas, et.al., 1980):

- Bentuk Model AR mempunyai pola gerakan yang tergantung dari waktu (harga dari variabel pada waktu saat ini tergantung harga pada waktu yang lalu)
- Merupakan model paling sederhana penggunaannya

Dalam studi ini untuk membangkitkan data historis dipergunakan model *autoregressive* Markov oleh Thomas dan Fiering. Perkembangan model Markov pertama kali dikembangkan pada Universitas Colorado dan Harvard untuk membangkitkan data aliran stokastik tahun 1960. Penggunaan model Markov untuk membangkitkan data debit tahunan oleh Brittan, dirumuskan sebagai berikut (Mc. Mahon dan Mein, 1978) :

$$q_i = \bar{q} + r_1(q_{i-1} - \bar{q}) + t_i \cdot S \sqrt{(1 - r_1^2)} \dots \dots \dots (2.30)$$

Dengan,

q_i = Data debit hasil pembangkitan yang dicari (pada tahun ke-i)

q_{i-1} = Data debit pada tahun sebelumnya (tahun ke i-1)

\bar{q} = Nilai rerata data debit tahunan

r_1 = Koefisien serial korelasi tahunan lag -1

S = Simpangan baku tahunan

t_i = Nilai acak berdistribusi normal baku (pada tahun ke-i)

Pembangkitan data sintetik model Markov oleh Thomas dan Fiering dikembangkan untuk membangkitkan data debit sintetik musiman. Waktu bulanan dapat diartikan sebagai 12 -musiman dalam setahun. Secara implisit, model ini memungkinkan adanya data aliran bulanan yang tidak stasioner (Clarke, 1973). Dalam model ini, data selama n tahun dibagi menjadi 12 bagian. Data dari setiap bagian diregresikan terhadap bulan sebelumnya, sehingga didapatkan 12 persamaan regresi linier. Variasi musiman ditunjukkan oleh penggunaan hubungan regresi bulanan. Untuk data aliran historis berdistribusi normal, rumus pembangkitannya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$q_{i,j} = \bar{q}_j + b_j \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1}) + t_{i,j} \cdot S_j \cdot \sqrt{(1 - r_j^2)} \dots \dots \dots (2.31)$$

Dengan,

$q_{i,j}$ = Data debit hasil pembangkitan yang dicari (pada tahun ke-i, bulan ke-j)

$q_{i,j-1}$ = Data debit pada tahun ke-i, bulan ke- j-1 (pada bulan sebelumnya)

\bar{q}_j = Nilai rerata debit bulan ke-j

\bar{q}_{j-1} = Nilai rerata debit pada bulan sebelumnya (bulan ke- j-1)

r_j = Koefisien korelasi debit bulan ke-j dengan bulan ke-j-1

b_j = Koefisien regresi bulan ke-j

S_j = Simpangan baku bulan ke-j

$t_{i,j}$ = Nilai acak berdistribusi normal baku (pada tahun ke-i, bulan ke-j)

Kelemahan dari pemilihan distribusi normal adalah debit sintetik yang dihasilkan dapat berharga negatif. Dalam kenyataan debit negatif tidak mungkin terjadi, maka debit negatif itu harus dianggap tidak ada atau sama dengan nol. Disarankan agar nilai negatif ini tetap dipakai untuk perhitungan selanjutnya, tetapi hasil akhir nilai ini diganti dengan nol. Bila debit yang berharga negatif itu lebih dari 5 %, maka data debit turunan tidak dapat dipakai sebagai dasar analisis selanjutnya (Mc. Mahon, 1978).

Sebelum menggunakan rumus di atas terlebih dahulu ditentukan distribusi data debit historisnya. Bila data debit historisnya berdistribusi normal, maka rumus di atas dapat langsung digunakan, tetapi bila berdistribusi log normal, maka model di atas diterapkan pada log Q dan bukan pada Q, sehingga nilai negatif tidak akan didapat (Raudkivi, 1979). Untuk pemakaian logaritma sebaiknya bilangan acaknya juga menggunakan logaritma, agar komponennya tidak menjadi terlalu besar. Namun bila distribusi data debit historisnya menunjukkan kecondongan yang berbeda dari kedua distribusi di atas, maka dapat dimasukkan ke dalam distribusi gamma (log pearson tipe III), sehingga rumus pembangkitan di atas dapat dipakai dengan koreksi pada nilai acak berdistribusi normal baku ($t_{i,j}$). Hal ini akan membuat nilai koefisien asimetrinya dipertahankan. Koreksi pada nilai acak $t_{i,j}$ menjadi $t_{i,j\gamma}$ menurut Thomas Burden dapat dipergunakan rumus sebagai berikut (Mc. Mahon dan Mein, 1978) :

$$t_{i,j} = \frac{2}{g_{i,j}} \left(1 + \frac{g_{i,j} t_{i,j}}{6} - \frac{g_{i,j}^3}{36} \right)^3 - \frac{2}{g_{i,j}} \quad (2.32)$$

$$g_{i,j} = \frac{g_j - r_{j-1}^3 \cdot g_{j-1}}{(1 - r_j^2)^{1.5}} \quad (2.33)$$

$$g_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{i,j}^3 - 3 \cdot S_j \cdot \overline{q_j} + \overline{q_j}^3}{S_j^3} \quad (2.34)$$

Dengan,

$t_{i,j}$ = Nilai acak untuk distribusi gamma (pada tahun ke-i, bulan ke-j)

$t_{i,j}$ = Nilai acak berdistribusi normal baku (pada tahun ke-i, bulan ke-j)

$g_{i,j}$ = Koefisien asimetri bulan ke-j untuk distribusi gamma

g_j = Koefisien asimetri bulan ke-j

r_j = Koefisien korelasi debit rerata bulan ke-j dengan bulan ke- j-1

r_{j-1} = Koefisien korelasi debit rerata bulan ke- j-1 dengan bulan ke- j-2

S_j = Simpangan baku pada bulan ke-j

$q_{i,j}$ = Debit pada tahun ke-i, bulan ke-j (m^3/dt)

$\overline{q_j}$ = Nilai rerata debit bulan ke-j

2.3.7 Validasi Model

Model yang dipergunakan untuk pembangkitan data dalam studi ini adalah :

$$q_{i,j} = \overline{q_j} + b_j \cdot (q_{i,j-1} - \overline{q_{j-1}}) + t_{i,j} \cdot S_j \cdot \sqrt{(1 - r_j^2)} \quad (2.35)$$

Sebelum data hasil bangkitan dipergunakan sebagai data *inflow* untuk menghitung nilai keandalan waduk, maka perlu dilakukan pengujian terhadap data hasil bangkitan tersebut, agar memberikan hasil yang memuaskan. Di sini uji kesamaan nilai rerata (*mean*) dan varian antara dua populasi digunakan untuk menguji apakah antara data historis dan data turunan (hasil pembangkitan) dapat dianggap berasal dari populasi yang sama dengan tingkat konfidensi tertentu.

Uji kesamaan nilai rerata antara data historis dengan data hasil bangkitan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut (Soewarno, 1995) :

1. Menentukan hipotesis sebagai berikut :

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (tidak terdapat perbedaan nyata nilai rerata antara data historis dan data hasil bangkitan)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (terdapat perbedaan nyata)

2. Menghitung statistik pengujian berdistribusi student-t, dengan rumus sebagai berikut :

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.36)$$

Dengan,

$$\sigma = \sqrt{\frac{n_1 \cdot S_1^2 + n_2 \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (2.37)$$

3. Menghitung derajat kebebasan dengan rumus sebagai berikut :

$$DK = n_1 + n_2 - 2 \quad (2.38)$$

Dengan,

DK = Derajat kebebasan

t = Statistik pengujian nilai rerata

\bar{X}_1 = Nilai rerata data historis

\bar{X}_2 = Nilai rerata data hasil bangkitan

σ = Simpangan baku data historis dan data hasil bangkitan

n_1 = Panjang data historis

n_2 = Panjang data hasil bangkitan

S_1 = Simpangan baku data historis

S_2 = Simpangan baku data hasil bangkitan

4. Menentukan daerah kritik dua sisi, yaitu - $t_{\alpha/2, (k; \alpha)}$ dan $t_{\alpha/2, (k; \alpha)}$ dengan derajat kebebasan DK dan tingkat kepercayaan α , diperoleh dari tabel distribusi t (lihat lampiran 4)
5. $H_0: \mu_1 = \mu_2$ diterima apabila - $t_{\alpha/2, (k; \alpha)} < t < t_{\alpha/2, (k; \alpha)}$

Uji kesamaan varian antara data historis dengan data hasil bangkitan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut (Soewarno Z., 1986) :

1. Menentukan hipotesis sebagai berikut :

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (tidak terdapat perbedaan nyata nilai varian antara data historis dan data hasil bangkitan)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (terdapat perbedaan nyata)

2. Menghitung statistik pengujian berdistribusi F, dengan rumus sebagai berikut :

$$F = \frac{n_1 \cdot S_1^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_2 \cdot S_2^2 \cdot (n_1 - 1)} \dots \dots \dots (2.39)$$

3. Menghitung derajat kebebasan (DK) dengan rumus sebagai berikut :

$$DK_1 = n_1 - 1 \dots \dots \dots (2.40)$$

$$DK_2 = n_2 - 1 \dots \dots \dots (2.41)$$

Dengan,

F = Statistik pengujian varian

S_1^2 = Varian data historis

S_2^2 = Varian data hasil bangkitan

n_1 = Panjang data historis

n_2 = Panjang data hasil bangkitan

DK_1 = Derajat kebebasan data historis

DK_2 = Derajat kebebasan data bangkitan

4. Menentukan luas daerah distribusi F, yaitu $F_{\alpha}(DK_1; DK_2; \alpha)$ dengan derajat kebebasan data historis DK_1 dan data hasil bangkitan DK_2 serta dengan tingkat kepercayaan α diperoleh dari tabel distribusi F (lihat lampiran 4)

5. $H_0: \mu_1 = \mu_2$ diterima apabila $1 / F_{\alpha}(k_2; k_1; \alpha/2) < F < F_{\alpha}(k_1; k_2; \alpha/2)$

2.4 Keandalan Waduk

Untuk menghitung keandalan waduk dipergunakan metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould. Metode tersebut dipergunakan karena mempertimbangkan faktor-faktor yang dominan dari waduk yaitu tampungan awal,

debit inflow, kebutuhan dan evaporasi. Dengan bantuan komputer metode tersebut lebih cepat dapat diselesaikan.

2.4.1 Metode Simulasi

Metode simulasi juga disebut analisis perilaku (*behaviour analysis*). Dalam metode simulasi, perubahan isi tampungan waduk terbatas dihitung dengan menggunakan persamaan kontinuitas tampungan sebagai berikut :

$$Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - E_t - L_t \dots\dots\dots(2.42)$$

$$\text{Untuk } 0 \leq Z_{t+1} \leq C$$

Dengan,

t = Periode waktu yang digunakan, biasanya 1 bulan

Z_{t+1} = Tampungan waduk pada akhir periode t (m^3)

= Tampungan waduk pada awal periode $t+1$ (m^3)

Z_t = Tampungan waduk pada awal periode t (m^3)

Q_t = Aliran masuk (inflow) selama periode t (m^3)

D_t = Kebutuhan selama periode t (m^3)

E_t = Evaporasi selama periode t (m^3)

L_t = Kehilangan air akibat bocoran dan rembesan selama periode t (m^3)

C = Kapasitas manfaat waduk, yang digunakan untuk menghitung banyaknya kegagalan waduk sepanjang rangkaian data (m^3)

0 = Posisi pada batas operasi minimum (MOL = *minimum operating level*)

Keandalan kapasitas waduk, dirumuskan sebagai berikut (Seyhan, 1979) :

$$R = 1 - (P / N) \dots\dots\dots(2.43)$$

Dengan,

R = Keandalan kapasitas waduk (%)

P = Banyaknya kejadian kegagalan waduk

N = Banyaknya data

2.4.2 Metode Matriks Probabilitas

Secara umum pendekatan Moran tentang prosedur kapasitas tampungan waduk, diklasifikasikan dalam tiga kelompok yaitu (Mc. Mahon dan Mein, 1978) :

1. Waktu dan volume dianggap sebagai variabel menerus

Diasumsikan bahwa *inflow* adalah berdistribusi poisson, ukuran bendungan kemungkinan tak terbatas dan pendekatan “ *bucket in the bath* “ untuk penyelesaian tidak realistik dalam kenyataan. Pemecahannya sangat kompleks dan kurang realistik, hanya menarik dari segi teori saja.

2. Waktu dianggap sebagai variabel terputus, sedangkan volume sebagai variabel menerus.

Moran (1955), mengemukakan persamaan integral sebagai berikut :

Untuk $X \leq C - D$

$$g(x) = f(x) \int_0^D g(x) \cdot dx + \int_D^{D+x} f(x + D - t) \cdot g(t) \cdot dt \dots \dots \dots (2.44)$$

Untuk $X > C - D$

$$g(x) = f(x) \int_0^D g(x) \cdot dx + \int_D^C f(x + D - t) \cdot g(t) \cdot dt + f(x + D - C) \int_C^\infty g(t) \cdot dt \dots (2.45)$$

Dengan,

x = Aliran masuk

C = Kapasitas waduk

D = Kebutuhan tiap satuan waktu

$f(x)$ = Fungsi probabilitas aliran masuk

$g(x)$ = Fungsi probabilitas isi waduk ditambah aliran masuk tiap satuan waktu

Aliran masuk diasumsikan berdistribusi gamma dan kebutuhan diasumsikan konstan, namun penyelesaian persamaan integral di atas sangat kompleks (Mc. Mahon dan Mein, 1978).

3. Waktu dan volume dianggap sebagai variabel terputus

Dipergunakan untuk penggunaan praktis, yaitu dengan membagi volume waduk menjadi beberapa bagian sehingga menghasilkan suatu persamaan yang mendekati persamaan integral diatas. Pendekatan utama tersebut akan mempengaruhi hasil pada batas tampungan (penuh dan kosong), tetapi akan sangat memuaskan bila pembagian volume tampungannya cukup baik

Moran (1954), membedakan 2 anggapan tentang aliran masuk dan aliran keluar, yaitu :

- A. Bahwa aliran masuk dan aliran keluar terjadi pada waktu yang tidak bersamaan, yang disebut dengan *Mutually Exclusive Model* (model dengan hubungan khusus) atau disebut juga model tidak simultan.
- B. Pengembangan anggapan Moran yaitu aliran masuk dan keluar terjadi secara bersamaan yang disebut *Simultaneous Model* (Model Simultan)

Model Simultan, menganggap bahwa waduk mungkin berakhir dan mulai pada keadaan penuh. Keadaan ini disebabkan karena asumsi bahwa aliran masuk terjadi bersamaan dengan aliran keluar. Persamaan penampungan model simultan sebagai berikut :

$$Z_{t+1} = 0 \quad \text{Jika } Z_t + X_t \leq M \dots\dots\dots(2.46)$$

$$Z_{t+1} = (Z_t + X_t) - M \quad \text{Jika } 0 < Z_t + X_t - M < K \dots\dots\dots(2.47)$$

$$Z_{t+1} = K \quad \text{Jika } Z_t + X_t - M \geq K \dots\dots\dots(2.48)$$

Nilai 0 adalah posisi batas minimum operasi (MOL = *minimum operating level*)

Dengan X_t dan M terjadi secara bersamaan

Setelah kapasitas, kebutuhan dan aliran masuk diketahui, selanjutnya membuat matrik transisi isi waduk, yaitu suatu matrik yang menunjukkan probabilitas keadaan akhir waduk pada akhir periode waktu, untuk setiap kemungkinan keadaan awal waduk pada periode waktu tersebut. Pemahaman matrik transisi dilakukan dengan cara membuat *tally sheet* yang menunjukkan

hubungan kondisi tampungan waduk pada awal periode dan pada akhir periode melalui cara *running* berdasarkan data historis.

Model Tidak Simultan, menganggap bahwa waduk tidak pernah berakhir dan mulai pada keadaan penuh, karena berasumsi bahwa aliran masuk selalu mendahului aliran keluar. Persamaan penampungan model tidak simultan sebagai berikut :

$$Z_{t+1} = 0 \quad \text{Jika } Z_t + X_t \leq M \dots\dots\dots(2.49)$$

$$Z_{t+1} = (Z_t + X_t) - M \quad \text{Jika } M < Z_t + X_t < K \dots\dots\dots(2.50)$$

$$Z_{t+1} = K - M \quad \text{Jika } K \leq Z_t + X_t \dots\dots\dots(2.51)$$

X_t dan M terjadi pada waktu yang tidak bersamaan.

Dengan,

t = Periode waktu dalam 1 tahun

Z_t = Tampungan waduk pada awal periode t (m^3)

Z_{t+1} = Tampungan waduk pada awal periode $t+1$ (m^3)

= Tampungan waduk pada akhir periode t (m^3)

K = Kapasitas tampungan waduk (m^3)

X_t = Aliran masuk selama periode t (m^3)

M = Kebutuhan selama periode t (m^3)

Matrik Keadaan Tetap

Setelah matrik transisi diketahui, baru dapat dihitung matrik keadaan tetap dengan persamaan sebagai berikut :

$$[P]_{t+1} = [T] [P]_t \dots\dots\dots(2.52)$$

Dengan,

$[P]_{t+1}$ = Matriks probabilitas isi waduk pada akhir tahun ke- t

= Matriks probabilitas isi waduk pada awal tahun ke- $t+1$

$[T]$ = Matriks transisi isi waduk

$[P]_t$ = Matriks probabilitas isi waduk pada tahun t

Keadaan tetap tercapai jika $[P]_{t+1} = [P]_t$

Atau dipergunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{Matriks keadaan tetap} = [T]^{2m} \dots\dots\dots (2.53)$$

Dengan,

$[T]$ = Matriks transisi isi waduk

m = Bilangan bulat positif

Keadaan tetap tercapai jika kolom-kolom matriks bernilai sama pada setiap bagian elemennya.

2.4.3 Metode Matriks Probabilitas Gould

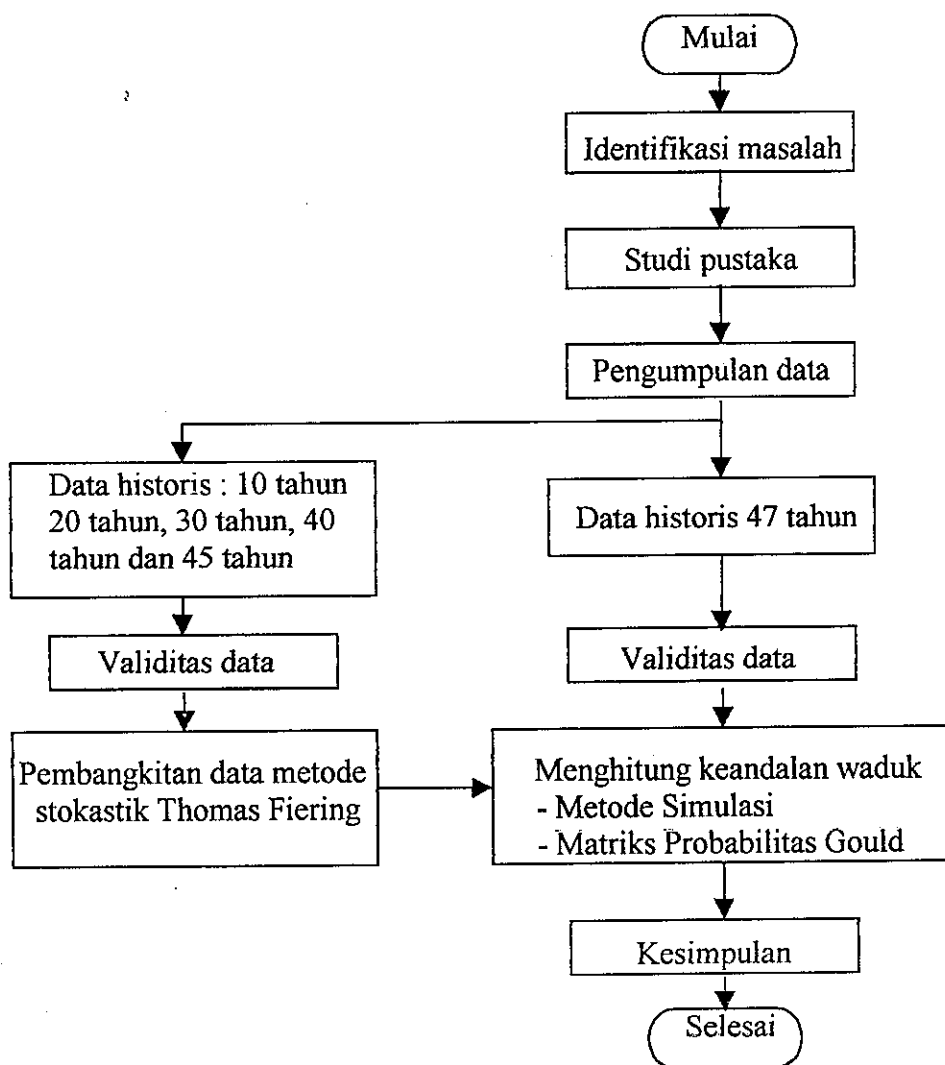
Pada model tidak simultan karena beranggapan aliran masuk selalu mendahului aliran keluar, sehingga waduk tidak pernah penuh pada akhir periode tertentu, sehingga probabilitas kegagalan dan probabilitas limpasan nilainya akan lebih besar dari perkiraan. Maka model simultan akan lebih mewakili atau realistik.

Pada model simultan, data yang dipergunakan mempunyai periode tahunan dengan menganggap aliran masuk tahunan sebagai variabel bebas (*independent*), namun periode ini terlalu lama untuk analisis akhir. Bila digunakan data debit bulanan, maka model simultan menjadi tidak realistik karena debit bulanan biasanya tidak independen.

Gould mengembangkan model simultan Moran tersebut, dengan memasukkan pengaruh variasi bulanan dan koreksi serial aliran masuk, yang dikerjakan dengan menggunakan matriks transisi dengan periode tahunan. Namun dalam menghitung tampungan bulanan dikerjakan dengan menggunakan metode simulasi, sehingga variasi aliran bulanan, koreksi serial bulanan dan variasi kebutuhan dapat dimasukkan. Pada metode ini keadaan awal waduk tidak begitu penting dan pengambilan air waduk tidak harus konstan (Mc. Mahon dan Mein, 1978).

BAB III METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian pada : Waduk Kedung Ombo Jawa Tengah. Langkah-langkah dalam penelitian disajikan dalam bentuk bagan alir sebagai berikut :



Gambar 3.1 Bagan Alir Langkah-langkah Penelitian

3.1 Identifikasi Masalah

Permasalahan dalam studi ini adalah untuk menganalisis keandalan suatu waduk diperlukan data historis yang cukup panjang, namun karena tidak semua

waduk memiliki data historis yang panjang, sehingga data historis tersebut perlu diperpanjang (dibangkitkan) sebelum dipergunakan untuk menghitung keandalan waduk. Tema yang diangkat pada studi ini adalah apakah panjang-pendeknya data debit historis yang tersedia akan berpengaruh terhadap nilai keandalan suatu waduk.

Pemilihan lokasi pada waduk Kedung Ombo, karena data yang tersedia pada waduk tersebut cukup lengkap. Dalam penelitian ini, dipergunakan data debit historis hasil pencatatan selama 47 tahun (1952 –1998), yang dibagi dalam 6 (enam) kelompok panjang data, yaitu : 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun, 45 tahun dan 47 tahun. Untuk kelompok panjang data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun masing-masing dibangkitkan selama 80 tahun. Data hasil bangkitan tersebut diambil 50 tahun yang terakhir, kemudian dipergunakan sebagai data *inflow* pada perhitungan keandalan waduk. Untuk kelompok panjang data 47 tahun, data historis tersebut langsung dipergunakan sebagai data *inflow* untuk menghitung keandalan waduk.

Untuk perhitungan Pembangkitan data digunakan metode stokastik Thomas Fiering, sedangkan untuk perhitungan keandalan waduk digunakan metode simulasi dan matriks probabilitas Gould. Untuk menyelesaikan analisis perhitungan tersebut dipergunakan alat bantu komputer dengan *software* bahasa program Clipper 5.0.

3.2 Data yang Diperlukan

Dengan studi pustaka yang telah dikemukakan dalam bab II tersebut dipergunakan untuk mengumpulkan data-data yang diperlukan dalam studi, membangkitkan data, kemudian digunakan untuk menyelesaikan perhitungan keandalan waduk.

Data yang dipergunakan pada studi ini adalah data sekunder yang diperoleh dari DPU Ditjen Pengairan, Direktorat Irigasi II, Badan Pelaksana Proyek Induk Pengembangan Wilayah Sungai Jratunseluna. Data yang dibutuhkan meliputi :

1. Data teknis bendungan Kedung Ombo
2. Data debit aliran masuk (*inflow*)
3. Data evaporasi
4. Data kebutuhan riil (irigasi, listrik dan air baku) dari waduk

5. Data pelengkap lainnya (peta lokasi, pengoperasian waduk dsb.)

3.3 Validitas Data

Data sekunder yang telah diperoleh dari DPU Ditjen Pengairan, Direktorat Irigasi II, Badan Pelaksana Proyek Induk Pengembangan Wilayah Sungai Jratunseluna dikumpulkan, disunting dan dipilih data-data yang diperlukan saja. Data sekunder yang akan dipergunakan dalam analisis perhitungan selanjutnya perlu diuji validitasnya. Dalam menguji validitas data dipergunakan uji homogenitas (keseragaman), baik berdasarkan pada harga rata-rata maupun pada harga simpangan baku.

3.4 Pendekatan Masalah

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa asumsi untuk menyederhanakan masalah, sehingga memungkinkan untuk diselesaikan dengan data yang tersedia dan metode yang dipergunakan.

3.4.1 Pembangkitan Data

Untuk memperoleh debit sintetik dengan menggunakan metode stokastik Thomas Fiering dipergunakan asumsi dan ketentuan sebagai berikut :

- a. Pencatatan data debit historis yang tersedia selama 47 tahun dianggap tidak mempunyai kesalahan pencatatan.
- b. Panjang rangkaian data debit historis yang dipergunakan adalah data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun, kemudian masing-masing kelompok data tersebut dibangkitkan selama 80 tahun.
- c. DPS Kali Serang dianggap mempunyai kondisi yang mantap, sehingga data historis yang tersedia memenuhi persyaratan untuk diperpanjang dengan pembangkitan stokastik.

3.4.2 Keandalan Waduk

Untuk menghitung keandalan waduk dipergunakan metode analisis simulasi dan metode matriks probabilitas Gould. Beberapa asumsi dan ketentuan dalam menghitung keandalan waduk sebagai berikut :

- Data debit yang dipergunakan sebagai data *inflow* merupakan data debit hasil bangkitan dari metode stokastik Thomas Fiering sepanjang 80 tahun (diambil 50 tahun yang terakhir) dan data historis 47 tahun.
- Kebutuhan air merupakan kebutuhan total yang riil dari waduk untuk irigasi, air baku dan tenaga listrik
- Pola pengoperasian waduk tidak diperhitungkan.
- Kehilangan air akibat bocoran dan rembesan pada waduk diabaikan
- Interpolasi liku hubungan antara volume tampungan aktif dengan elevasi dilakukan secara non linier
- Debit tahunan dianggap variabel bebas (independen)

3.5 Analisis Perhitungan

3.5.1 Pembangkitan Data

Prosedur perhitungan pembangkitan data debit bulanan dengan metode Generator Stokastik Thomas-Fiering adalah sebagai berikut :

- Menghitung debit rerata tiap-tiap bulan dari data historis yang tersedia dengan rumus sebagai berikut :

$$\bar{q}_j = \frac{\sum_{i=1}^n q_{i,j}}{n} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dengan

\bar{q}_j = Debit rerata bulan ke-j (m^3/ dt)

$q_{i,j}$ = Debit tahun ke-i, bulan ke-j (m^3/ dt)

n = Panjang data bulan ke-j

- Menghitung simpangan baku (standar deviasi) tiap-tiap bulan sepanjang data debit historis dengan rumus sebagai berikut :

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j)^2}{n-1}} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dengan,

S_j = Simpangan baku bulan ke-j

$q_{i,j}$ = Debit tahun ke-i, bulan ke-j (m^3/dt)

\bar{q}_j = Debit rerata bulan ke-j (m^3/dt)

c. Menghitung koefisien korelasi tiap-tiap bulan dengan rumus berikut :

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j) \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j)^2 \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1})^2}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Dengan,

r_j = Koefisien korelasi debit rerata bulan ke-j dengan bulan ke-j-1

$q_{i,j}$ = Debit tahun ke-i, bulan ke-j (m^3/dt)

\bar{q}_j = Debit rerata bulan ke-j (m^3/dt)

$q_{i,j-1}$ = Debit tahun ke-i, bulan ke j-1 (m^3/dt)

\bar{q}_{j-1} = Debit rerata bulan ke j-1 (m^3/dt)

d. Menghitung koefisien regresi bulanan dengan rumus berikut :

$$b_j = \frac{r_j \cdot S_j}{S_{j-1}} \dots\dots\dots (3.4)$$

Dengan,

b_j = Koefisien regresi bulan ke-j

r_j = Koefisien korelasi debit rerata bulan ke-j dengan bulan ke-j-1

S_j = Simpangan baku bulan ke-j

S_{j-1} = Simpangan baku bulan ke j-1

e. Menghitung koefisien variasi bulanan dengan rumus berikut :

$$Cv_j = \frac{S_j}{\bar{q}_j} \dots\dots\dots (3.5)$$

f. Menghitung koefisien asimetri bulanan dengan rumus berikut :

$$g_j = 3 C_{vj} + C_{vj}^3 \dots\dots\dots (3.6)$$

atau dengan rumus :

$$g_j = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{i,j}^3 - 3.S_j^2 \cdot \overline{q_j} + \overline{q_j}^3}{S_j^3} \dots\dots\dots (3.7)$$

Dengan,

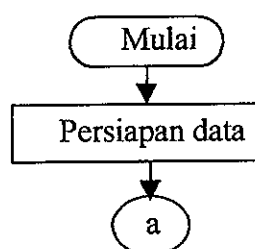
C_{vj} = Koefisien variasi bulan ke-j

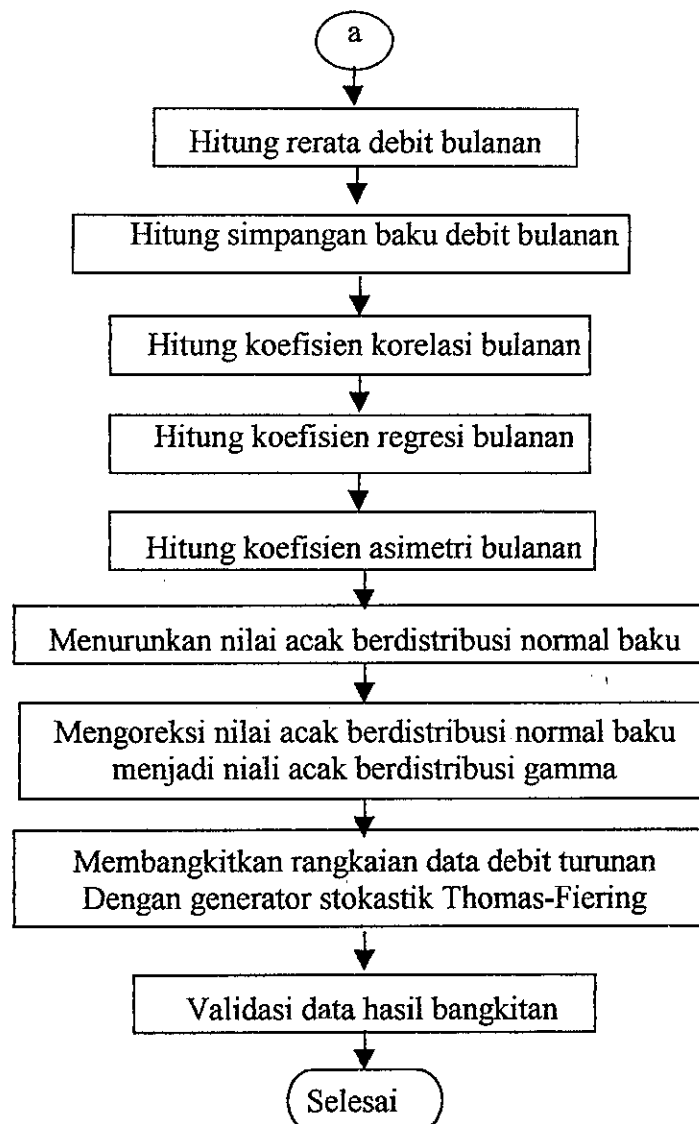
g_j = Koefisien asimetri bulan ke-j

- g. Membangkitkan rangkaian bilangan acak berdistribusi seragam (*uniform distribution*) yang terletak antara 0 dan 1, diperoleh dari komputer.
- h. Mengubah rangkaian bilangan acak berdistribusi seragam (*uniform distribution*) antara 0 dan 1 menjadi rangkaian bilangan acak berdistribusi normal baku (nilai rerata = 0, simpangan baku = 1) menggunakan teorema batas sentral yaitu dengan cara menjumlahkan n bilangan acak berdistribusi seragam kemudian dikurangi n/2.
- i. Mengoreksi nilai acak berdistribusi normal baku ($t_{i,j}$) menjadi nilai acak berdistribusi gamma ($t_{i,\gamma,j}$)
- j. Membangkitkan rangkaian data turunan dengan menggunakan rumus stokastik Thomas-Fiering (2.31) seperti dalam tinjauan pustaka, yaitu :

$$q_{i,j} = \overline{q_j} + b_j \cdot (q_{i,j-1} - \overline{q_{j-1}}) + t_{i,\gamma,j} \cdot S_j \cdot \sqrt{(1-r_j^2)}$$

Bentuk bagan alir untuk perhitungan Pembangkitan data adalah sebagai berikut :





Gambar 3.2 Bagan alir perhitungan pembangkitan data

3.5.2 Menghitung Keandalan Waduk

3.5.2.1 Metode Simulasi

Prosedur perhitungan keandalan waduk dengan metode Simulasi adalah :

1. Menentukan kapasitas aktif waduk dan dianggap keadaan awal waduk penuh ($Z_t = C$).
2. Dengan persamaan kontinuitas (2.42) seperti dijelaskan dalam tinjauan pustaka, dihitung perilaku waduk sepanjang data debit.

3. Menghitung banyaknya kejadian kegagalan (P), yaitu pelepasan air dari waduk tidak dapat memenuhi kebutuhannya (Volume akhir waduk setiap bulan kurang dari atau sama dengan tampungan minimum)
4. Menghitung probabilitas kegagalan dengan rumus sebagai berikut :

$$Pe = P / n \dots\dots\dots(3.8)$$

Dengan,

Pe = Tingkat kegagalan (%)

P = Banyaknya kejadian kegagalan

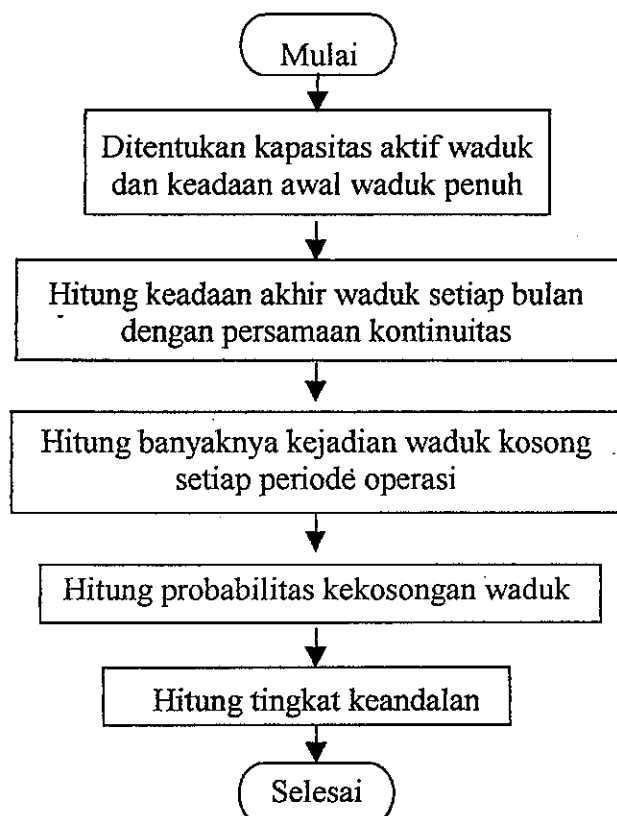
n = Banyaknya data

5. Menghitung tingkat keandalan waduk dengan rumus sebagai berikut :

$$R = 1 - Pe \dots\dots\dots(3.9)$$

Dengan, R = Tingkat keandalan (%)

Berikut ini disajikan bagan alir perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi yaitu :



Gambar 3.3 Bagan alir perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi

3.5.2.2 Metode Matriks Probabilitas Gould

Prosedur hitungan keandalan waduk dengan metode matriks probabilitas dapat dilakukan sebagai berikut :

- Menentukan kebutuhan tiap bulan pada operasi waduk tertentu
- Menentukan kapasitas aktif waduk tersebut
- Kapasitas aktif waduk dibagi menjadi beberapa zone, misalnya k zone. Secara umum pembagian kapasitas waduk dengan 20 zone sudah cukup teliti. Teoh (1977) seperti yang dikutip Mahon, melakukan analisis menggunakan prosedur Gould menentukan pembagian zone berdasarkan nilai koefisien variansi (Cv).

Pembagian tersebut adalah sebagai berikut :

$C_v < 0,5$ menggunakan 10 zone

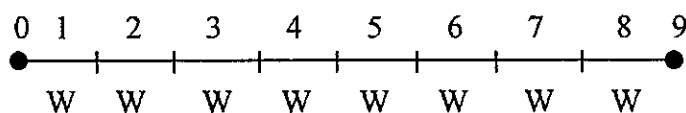
$0,5 < C_v < 1,0$ menggunakan 20 zone

$1,0 < C_v < 1,5$ menggunakan 30 zone

$C_v > 1,5$ menggunakan 40 zone

- Menentukan susunan masing-masing zone

Tabel 3.1 Contoh susunan masing-masing zone



- Menentukan volume termasuk kondisi penuh dan kondisi kosong, dengan rumus sebagai berikut :

$$W = C / (z - 2) \dots\dots\dots(3.10)$$

Dengan,

W = Volume tiap zone (Juta m^3)

C = Kapasitas aktif waduk(Juta m^3)

z = Jumlah zone

- f. Selanjutnya dibuat “ *tally sheet* ” untuk menyusun matriks transisi pada kondisi awal dan kondisi akhir setiap zone.

Tabel 3.2 Contoh “ *tally sheet* ”

		Z _t (kondisi awal)							
		Zone	0	1	2	3	4	5	19
K o n d i s i (Z _{t+1})	a	0							
	1								
	2								
	3								
	4								
	19								

- g. Dengan persamaan kontinuitas, yaitu : $Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - E_t$; dihitung kondisi akhir waduk tahun pertama untuk kondisi awal waduk setiap zone. Demikian juga untuk tahun-tahun berikutnya yang dituliskan dalam “ *tally sheet* ”.
- h. Disusun juga matriks kegagalan dalam “ *tally sheet* ” untuk menentukan kondisi kegagalan (yaitu : volume akhir waduk setiap bulan kurang dari atau sama dengan tampungan minimum).

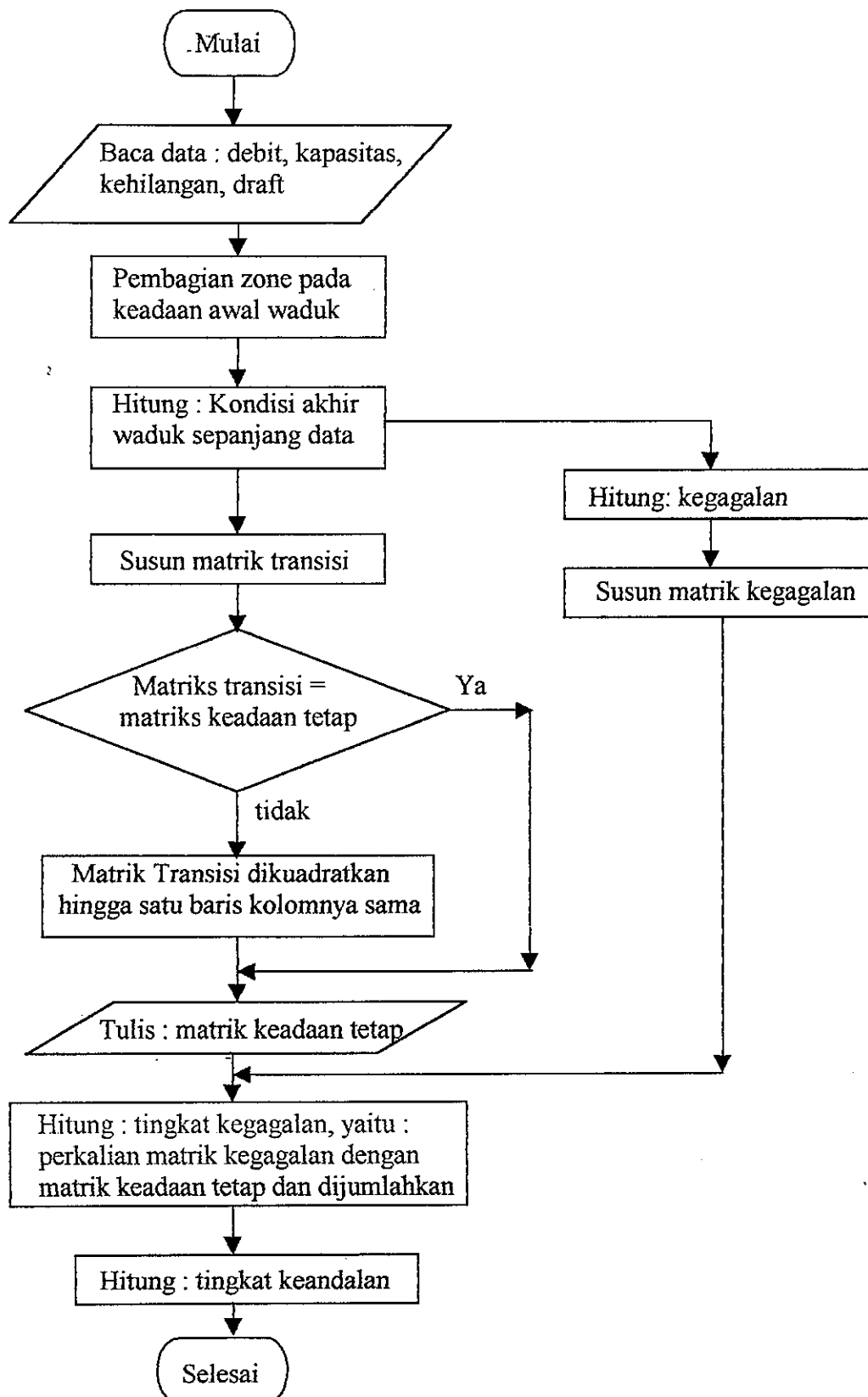
Tabel 3.3 Contoh “ *tally sheet* ” kegagalan

		Z _t (kondisi awal)							
		Z _t	0	1	2	3	4	5	19
kosong (kali)									

- i. Setelah matriks transisi disusun, kemudian menghitung matriks kondisi tetap. Matrik kondisi tetap dihitung dengan cara memangkatkan matriks transisi dengan bilangan genap hingga beberapa kali sampai diperoleh matriks dengan kolom-kolom yang bernilai sama dalam satu baris.

- j. Tingkat kegagalan waduk, dihitung dengan cara mengalikan matriks kondisi tetap dengan matriks probabilitas kegagalan kemudian dijumlahkan.
- k. Tingkat keandalan waduk, dihitung dengan cara 100 % dikurangi tingkat kegagalan.

Selanjutnya bentuk bagan alir perhitungan keandalan waduk dengan menggunakan metode Matrik Probabilitas disajikan sebagai berikut :



Gambar 3.4 Bagan alir keandalan dengan metoda matriks probabilitas Gould

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Tersedia

Data yang dipergunakan pada studi ini adalah data sekunder yang diperoleh dari DPU Ditjen Pengairan, Direktorat Irigasi II, Badan Pelaksana Proyek Induk Pengembangan Wilayah Sungai Jratunseluna.

Data yang tersedia meliputi :

1. Data teknis bendungan Kedung Ombo

- a. Luas Daerah Pengaliran Sungai (DPS) = + 614 km²
- b. Elevasi muka air (m.a) banjir maksimum = + 95,0 m
- c. Elevasi muka air penuh (FSL = *Full Supply Level*) = + 90,0 m
- d. Elevasi m.a. minimum (MOL = *Minimum Operating level*) = + 64,5 m
- e. Luas daerah genangan waduk pada FSL = 46,0 km²
- f. Volume tampungan total pada FSL = 723 x 10⁶ m³
- g. Volume tampungan mati = 88,4 x 10⁶ m³
- h. Volume tampungan aktif = 634,6 x 10⁶ m³
- i. Sedimen *inflow* tahunan = 2,88 x 10⁶ ton/th
- j. Hubungan antara elevasi - luas genangan dan elevasi - volume tampungan waduk disajikan dalam Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hubungan antara elevasi, luas genangan dan kapasitas tampungan

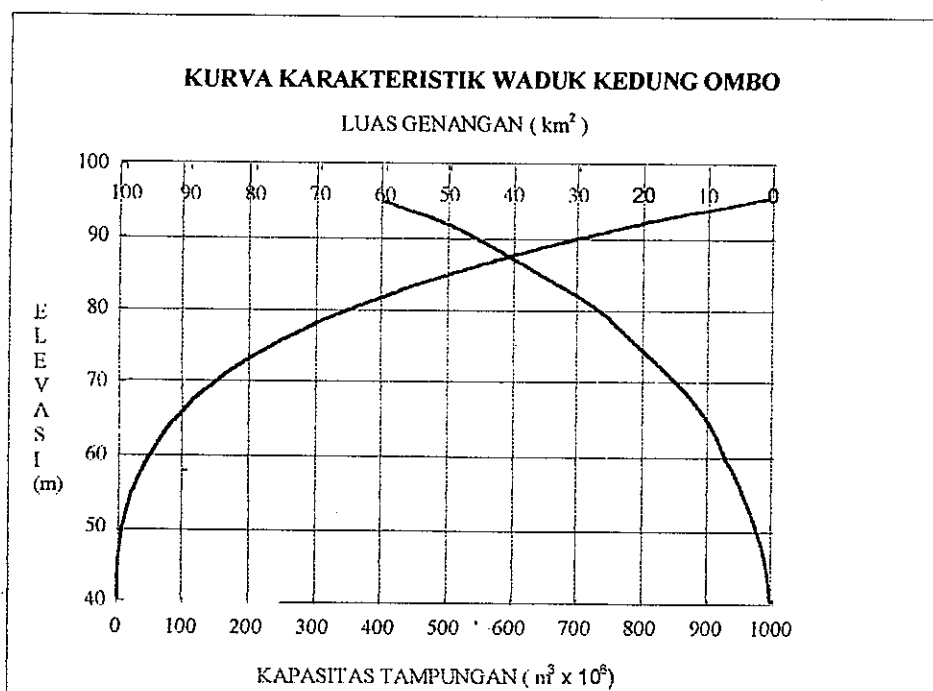
Elevasi (m)	Luas daerah genangan (km ²)	Kapasitas tampungan waduk (m ³ x 10 ⁶)
40	0,00	0,00
44	0,58	0,98
48	1,55	5,06
52	3,09	13,96
56	4,84	29,64
60	7,15	53,24
64	9,38	83,64
72	12,57	127,26
76	17,02	186,26

Lanjutan Tabel 4.1

Elevasi (m)	Luas daerah Genangan (km^2)	Kapasitas tampungan Waduk ($\text{m}^3 \times 10^6$)
80	26,88	361,68
84	34,04	483,32
88	41,97	635,16
90	46,03	723,16
92	50,90	820,08
95	60,40	986,06

Sumber : PPKSA Jratun seluna, 2000

Kurva karakteristik hubungan antara elevasi, luas genangan dan kapasitas tampungan waduk dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut :



Sumber : PPKSA Jratunseluna, 2000

Gambar 4.1 Kurva karakteristik waduk Kedung Ombo

Berdasarkan Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 di atas hubungan antara elevasi (H) dengan tampungan (S) dan antara luas daerah genangan (A) dengan tampungan (S) diselesaikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut :

$$H = [43,94691 - 5,797805 \cdot \text{LN}(S) + 0,4272123 \cdot \{\text{LN}(S)\}^2] / [1 - 0,1740918 \cdot \text{LN}(S) + 0,009596045 \cdot \{\text{LN}(S)\}^2] \dots\dots\dots(4.1)$$

$$A = 0,3203756 (S)^{0,7566426} \dots\dots\dots(4.2)$$

k. Bendungan

- Tinggi Bendungan = 61 m
- Panjang puncak bendungan (*crest length*) = 1600 m
- Elevasi puncak bendungan (*crest level*) = + 96,0 m
- Lebar puncak bendungan (*crest width*) = 12,0 m
- Volume timbunan bendungan (*Embankment volume*) = $6,2 \times 10^6 \text{ m}^3$

l. Data stasiun pembangkit (PLTA)

- Jumlah unit pembangkit = 1
- Tipe turbin = Kaplan
- Debit Pembangkit = $45 \text{ m}^3/\text{dt}$
- Kapasitas (*Output generator*) = 22,5 MW

2. Data debit aliran masuk waduk (*inflow*)

Data rangkaian panjang debit inflow waduk Kedung Ombo selama 47 tahun, yang tercatat mulai tahun 1952 sampai 1998 (lihat Lampiran 1)

3. Data evaporasi

Data evaporasi rerata bulanan waduk Kedung Ombo disajikan pada Tabel 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.2 Evaporasi rerata bulanan waduk Kedung Ombo

Bulan	Evaporasi (mm/hr)
Januari	3,87
Pebruari	3,79
Maret	4,80
April	4,32
Mei	4,03
Juni	3,95
Juli	4,28
Agustus	4,92
September	4,98
Oktober	5,33
November	4,68
Desember	4,17

Sumber : PPKSA, 2000

4. Data kebutuhan air total riil (untuk irigasi, listrik dan air baku)

Data kebutuhan air total pada sistem waduk Kedung Ombo disajikan dalam Tabel 4.3 sebagai berikut :

Tabel 4.3 Kebutuhan air total dari waduk Kedung Ombo

Bulan	Kebutuhan air total (m ³ /dt)
Januari	9,14
Pebruari	9,84
Maret	34,98
April	38,77
Mei	34,21
Juni	9,41
Juli	12,13
Agustus	19,15
September	14,31
Oktober	43,64
Nopember	60,86
Desember	40,36

Sumber : PPKSA Jratunseluna, 2000

4.2 Pembahasan

4.2.1 Data *Inflow*

Data debit *inflow* bulanan waduk Kedung Ombo selama 47 tahun dari tahun 1952 s/d 1998, diambil enam kelompok panjang data, yaitu kelompok data 10 tahun (1952 s/d 1961), kelompok data 20 tahun (1952 s/d 1971), kelompok data 30 tahun (1952 s/d 1981), kelompok data 40 tahun (1952 s/d 1991), kelompok data 45 tahun (1952 s/d 1996) dan kelompok data 47 tahun (1952 s/d 1998). Kemudian masing-masing kelompok data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun tersebut dibangkitkan selama 80 tahun, kemudian diambil 50 tahun yang terakhir sebagai data *inflow* untuk menghitung keandalan waduk. Hal ini dilakukan untuk menghindari efek inisialisasi. Untuk kelompok data 47 tahun data historis tersebut, langsung dipergunakan sebagai data *inflow* untuk menghitung keandalan waduk. Untuk uji homogenitas data debit historis waduk Kedung Ombo selama 47 tahun menunjukkan bahwa data historis tersebut adalah homogen (Tarigan, 2001)

4.2.2 Pembangkitan Data

Pembangkitan data dilakukan terhadap tiga kelompok data, yaitu kelompok data 10 tahun (1952 s/d 1961), kelompok data 20 tahun (1952 s/d 1971), kelompok data 30 tahun (1952 s/d 1981) kelompok data 40 tahun (1952 s/d 1991) dan kelompok data 45 tahun (1952 s/d 1996). Kemudian masing- masing kelompok data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun tersebut dibangkitkan selama 80 tahun.

4.2.2.1 Sifat Statistik Data

Sifat-sifat statistik data debit *inflow* rerata tahunan yang waduk Kedung Ombo yang akan dibangkitkan sebagai berikut :

- Debit rerata tahunan (\bar{X}) = 26,01 m³/dt
- Simpangan baku (S) = 5,04
- Koefisien variasi (C_v) = 0,19
- Koefisien *skewness* (g) = 0,89
- Serial korelasi (r_k) = 0,189
- Koefisien Kurtosis (γ) = 3,90

4.2.2.2 Uji Homogenitas Data

Dalam uji homogenitas ini dilakukan pengujian terhadap lima kelompok rangkaian data yaitu data 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun. Dalam uji homogenitas terhadap lima kelompok rangkaian data ini, didapatkan hasil tiap kelompok rangkaian data adalah homogen.

Contoh uji homogenitas untuk data 45 tahun adalah sebagai berikut :

Untuk uji homogenitas (keseragaman) ini, rangkaian data sepanjang 45 tahun dibagi 2 kelompok yaitu kelompok 36 tahun pertama dan kelompok 9 tahun kedua. Pembagian kelompok tersebut berdasarkan grafik debit rerata waduk kedung ombo (lampiran 1). Dari grafik tersebut terlihat data seragam cenderung mengelompok pada 36 tahun pertama dan 9 tahun kedua. Perhitungan untuk masing-masing seperti tersaji dalam Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 sebagai berikut :

Tabel 4.4 Pengelompokan data 36 tahun pertama

No.	Tahun	Data (x_1)	$x_1 - X_1$	$(x_1 - X_1)^2$
1	1952	25.32	0.99	0.98
2	1953	24.91	0.57	0.33
3	1954	24.04	-0.30	0.09
4	1955	29.62	5.29	27.94
5	1956	26.83	2.49	6.21
6	1957	26.43	2.10	4.39
7	1958	36.07	11.73	137.64
8	1959	38.97	14.64	214.19
9	1960	26.57	2.23	4.99
10	1961	21.08	-3.26	10.63
11	1962	22.29	-2.04	4.18
12	1963	25.40	1.06	1.13
13	1964	21.25	-3.08	9.50
14	1965	23.30	-1.03	1.07
15	1966	30.41	6.07	36.89
16	1967	25.79	1.45	2.11
17	1968	32.07	7.73	59.81
18	1969	24.80	0.46	0.21
19	1970	19.77	-4.57	20.86
20	1971	26.76	2.42	5.87
21	1972	18.33	-6.01	36.10
22	1973	28.71	4.38	19.17
23	1974	28.77	4.43	19.66
24	1975	36.23	11.89	141.48
25	1976	24.17	-0.16	0.03
26	1977	21.25	-3.09	9.55
27	1978	19.95	-4.39	19.27
28	1979	25.33	1.00	0.99
29	1980	19.73	-4.60	21.17
30	1981	26.18	1.85	3.42
31	1982	33.43	9.09	82.68
32	1983	5.66	-18.68	348.84
33	1984	12.06	-12.28	150.79
34	1985	15.94	-8.40	70.51
35	1986	11.71	-12.63	159.47
36	1987	16.97	-7.37	54.30

Rerata (X_1) = 24.34 Jumlah = 1686.44

S Deviasi (S_1) = 5.94

Tabel 4.5 Pengelompokan data 9 tahun kedua

No.	Tahun	Data (x_2)	$x_2 - X_2$	$(x_2 - X_2)^2$
1	1988	23.43	-1.02	1.03
2	1989	24.93	0.49	0.24
3	1990	19.82	-4.62	21.38
4	1991	25.73	1.29	1.65
5	1992	26.45	2.00	4.01
6	1993	26.38	1.94	3.75
7	1994	23.19	-1.25	1.57
8	1995	26.12	1.68	2.82
9	1996	23.94	-0.50	0.25

Rerata (X_2) = 24.44 Jumlah = 36.71

S Deviasi (S_2) = 2.14

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_1)^2 + \sum (X_j - \bar{X}_2)^2}{N_1 + N_2 - 2}} \dots\dots\dots(4.3)$$

$$S = \sqrt{\frac{1686,44 + 36,71}{36 + 9 - 2}} = 6,330$$

Setelah data debit tahunan dibagi dua kelompok selanjutnya diuji kestabilan kedua kelompok data tersebut, yang berdasarkan pada harga rata-rata dan harga simpangan baku sebagai berikut :

a. Pengujian berdasarkan pada harga rata-rata

$$t_c = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S \sqrt{\frac{(N_1 + N_2)}{N_1 \cdot N_2}}} \dots\dots\dots(4.4)$$

$$t_c = \frac{|24,34 - 24,44|}{6,330 \times \sqrt{\frac{36 + 9}{36 \times 9}}} = 0,046$$

Pada tabel student t dengan tingkat kepercayaan $\alpha = 5 \%$ dan derajat kebebasan $(N_1 + N_2 - 2)$ diperoleh $t_{(0,05;43)} = 1,645$ (lihat Lampiran 4), maka $t_c = 0,046 < t_{(0,05;43)} = 1,645$ (data homogen).

b. Pengujian berdasarkan pada harga simpangan baku (standar deviasi)

$$t_c = \frac{|\bar{S}_1 - \bar{S}_2|}{S \sqrt{\frac{(N_1 + N_2)}{N_1 \cdot N_2}}} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$t_c = \frac{|5,94 - 2,14|}{6,330 \times \sqrt{\frac{36 + 9}{36 \times 9}}} = 1,610$$

Pada tabel student t dengan tingkat kepercayaan $\alpha = 5 \%$ dan derajat kebebasan $(N_1 + N_2 - 2)$ diperoleh $t_{(0,05;43)} = 1,645$ (lihat Lampiran 4), maka $t_c = 1,610 < t_{(0,05;43)} = 1,645$ (data homogen).

4.2.2.3 Distribusi Data

Untuk menentukan apakah rangkaian data historis berdistribusi normal atau bukan, maka cara yang relatif mudah adalah dengan memplot data dalam kertas probabilitas normal. Apabila berdistribusi normal *plotting*-nya dalam kertas probabilitas akan merupakan garis lurus (dengan batas penyimpangan tertentu). Uji normalitas dapat pula digunakan dengan menghitung koefisien *asimetri*-nya, apabila nilai koefisien *asimetri*-nya antara $-0,3$ sampai $0,3$, maka dapat diasumsikan bahwa rangkaian datanya berdistribusi normal.

Distribusi yang juga digunakan secara luas adalah distribusi log normal, baik parameter dua maupun tiga. Bila logaritma datanya berdistribusi normal, maka dapat ditentukan rangkaian tersebut berdistribusi log normal. Secara mudah dapat pula pengujian distribusi log normal dilakukan dengan memplot data historis pada kertas probabilitas log normal. Distribusi log normal dapat pula digunakan dengan menghitung koefisien *asimetri*-nya atau *skewness* (g), apabila nilai koefisien *asimetri*-nya mendekati tiga kali koefisien variasi ($3C_v$), maka rangkaian data tersebut dapat diasumsikan berdistribusi log normal

Populasi rangkaian aliran tidak mungkin tepat berdistribusi normal. Namun meskipun demikian masih dapat ditentukan bila dibandingkan dengan distribusi lain.

Distribusi Gamma atau distribusi log Pearson tipe I merupakan distribusi ketiga yang banyak digunakan dalam pembangkitan data aliran. Bila data historis menunjukkan kecondongan yang berbeda dari kedua distribusi yang diatas, maka dapat dimasukkan kedalam distribusi gamma (Mc. Mahon dan Mein, 1978).

Berdasarkan sifat statistik data debit tahunan di atas diperoleh koefisien *skewness* (g) = $0,89$ dan koefisien variasi (C_v) = $0,19$; untuk nilai $3 C_v = 0,57$, Karena nilai koefisien *skewness*-nya tidak berkisar antara $-0,3$ s/d $0,3$, maka distribusinya bukan berdistribusi normal, Dan untuk nilai $3 C_v$ ternyata tidak mendekati nilai koefisien *skewness*-nya, sehingga kemungkinan juga tidak berdistribusi log normal, sehingga disimpulkan bahwa distribusi data debit *inflow* tahunan waduk Kedung Ombo termasuk dalam distribusi gamma.

4.2.2.4 Perhitungan Pembangkitan Data

Untuk perhitungan pembangkitan data dipergunakan metode stokastik Thomas Fiering dengan rumus pembangkitan sebagai berikut :

$$q_{i,j} = \bar{q}_j + b_j \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1}) + t_{i,j,j} \cdot S_j \cdot \sqrt{(1 - r_j^2)} \dots \dots \dots (4.6)$$

Kemudian masing-masing kelompok data historis yaitu 10 tahun, 20 tahun dan 30 tahun tersebut dibangkitkan selama 50 tahun, sehingga dihasilkan tiga kelompok data hasil pembangkitan selama 50 tahun (lihat Lampiran 3).

Contoh perhitungan pembangkitan data pada tahun pertama (ke-1) bulan Januari untuk data historis 10 tahun adalah sebagai berikut :

1. Menghitung parameter statistik data debit historis sebagai berikut :

- a. Debit rerata bulan Januari dihitung dengan rumus :

$$\bar{q}_j = \frac{\sum_{i=1}^n q_{i,j}}{n} \dots \dots \dots (4.7)$$

$$\begin{aligned} \bar{q}_j &= \frac{63,88 + 41,57 + 48,46 + 81,26 + 66,50 + 49,53 + 41,82 + 83,72 + 31,98 + 39,28}{10} \\ &= 54,80 \text{ m}^3/\text{dt} \end{aligned}$$

- b. Simpangan baku bulan Januari dihitung dengan rumus :

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j)^2}{n-1}} \dots \dots \dots (4.8)$$

$$\begin{aligned} S_j &= \sqrt{\frac{(63,88-54,80)^2 + (41,57-54,80)^2 + (48,46-54,80)^2 + (81,26-54,80)^2 + (66,50-54,80)^2 +}{10-1}} \\ &= \sqrt{\frac{(49,53-54,80)^2 + (41,82-54,80)^2 + (83,72-54,80)^2 + (31,98-54,80)^2 + (39,28-54,80)^2}{10-1}} = 18,04 \end{aligned}$$

c. Koefisien korelasi bulan Januari dihitung dengan rumus :

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j) \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_{i,j} - \bar{q}_j)^2 \cdot (q_{i,j-1} - \bar{q}_{j-1})^2}} \quad (4.9)$$

$$r_j = \frac{((63,88 - 54,80) \times (44,36 - 46,29)) + ((41,57 - 54,80) \times (52,32 - 46,29)) + ((48,46 - 54,80) \times (24,19 - 46,29)) + ((81,26 - 54,80) \times (40,67 - 46,29)) + ((66,50 - 54,80) \times (33,05 - 46,29)) + ((49,53 - 54,80) \times (60,19 - 46,29)) + ((41,82 - 54,80) \times (36,49 - 46,29)) + ((83,72 - 54,80) \times (76,26 - 46,29)) + ((31,98 - 54,80) \times (72,08 - 46,29)) + ((39,28 - 54,80) \times (23,29 - 46,29))}{\sqrt{((63,88 - 54,80)^2 \times (44,36 - 46,29)^2) + ((41,57 - 54,80)^2 \times (52,32 - 46,29)^2) + ((48,46 - 54,80)^2 \times (24,19 - 46,29)^2) + ((81,26 - 54,80)^2 \times (40,67 - 46,29)^2) + ((66,50 - 54,80)^2 \times (33,05 - 46,29)^2) + ((49,53 - 54,80)^2 \times (60,19 - 46,29)^2) + ((41,82 - 54,80)^2 \times (36,49 - 46,29)^2) + ((83,72 - 54,80)^2 \times (76,26 - 46,29)^2) + ((31,98 - 54,80)^2 \times (72,08 - 46,29)^2) + ((39,28 - 54,80)^2 \times (23,29 - 46,29)^2)}} = 0,14$$

d. Koefisien regresi bulanan dengan rumus :

$$b_j = \frac{r_j \cdot S_j}{S_{j-1}} \quad (4.10)$$

$$b_j = \frac{0,14 \times 18,04}{18,61} = 0,14$$

e. Koefisien variasi bulan Januari dihitung dengan rumus :

$$Cv_j = \frac{S_j}{q_j} \quad (4.11)$$

$$Cv_j = \frac{18,04}{54,80} = 0,34$$

f. Koefisien asimetri bulan Januari dihitung dengan rumus :

$$g_j = 3 Cv_j + Cv_j^3 \quad (4.12)$$

$$g_j = 3 \times 0,34 + (0,34)^3 = 1,02$$

g. Koefisien asimetri untuk distribusi gamma ($g_{t,j}$) dihitung dengan rumus :

$$g_{t,j} = \frac{g_j - r_{j-1}^3 \cdot g_{j-1}}{(1 - r_j^2)^{1,5}} \dots\dots\dots (4.13)$$

$$g_{t,j} = \frac{1,02 - (0,11)^3 \times 1,27}{(1 - (0,14)^2)^{1,5}} = 1,05$$

2. Membangkitkan rangkaian bilangan acak berdistribusi seragam dari komputer selama 80 tahun, lalu dirubah ke distribusi normal baku (nilai rerata = 0, simpangan baku = 1). Karena data historisnya berdistribusi gamma, maka harus mengoreksi nilai acaknya ($t_{i,j}$) menjadi $t_{i,j}$ dengan rumus sebagai berikut :

$$t_{i,j} = \frac{2}{g_{t,j}} \left(1 + \frac{g_{t,j} \cdot t_{i,j}}{6} - \frac{g_{t,j}}{36} \right) - \frac{2}{g_{t,j}} \dots\dots\dots (4.14)$$

$$t_{i,j} = \frac{2}{1,05} \left(1 + \frac{1,05 \times (0,96)}{6} - \frac{1,05}{36} \right) - \frac{2}{1,05} = 0,26$$

3. Membangkitkan rangkaian data debit historis dengan menggunakan rumus stokastik Thomas-Fiering , yaitu :

$$q_{i,j} = \overline{q_j} + b_j \cdot (q_{i,j-1} - \overline{q_{j-1}}) + t_{i,j} \cdot S_j \cdot \sqrt{(1 - r_j^2)} \dots\dots\dots (4.15)$$

$$q_{i,j} = 54,80 + 0,14 \times (46,29 - 46,29) + (0,26) \times 18,04 \sqrt{(1 - (0,14)^2)} = 59,52 m^3 / dt$$

Untuk hasil perhitungan pembangkitan data pada bulan dan tahun berikutnya disajikan pada Lampiran 3.

4.2.2.5 Validasi Data Hasil Bangkitan

Setelah didapatkan data hasil bangkitan, kemudian dilakukan validasi data hasil bangkitan, yaitu dengan uji kesamaan nilai rerata (*mean*) dan varian antara dua populasi.

Contoh uji kesamaan nilai rerata bulan Januari antara data historis dengan data hasil bangkitan (untuk data historis 10 tahun) adalah sebagai berikut :

1. Menentukan hipotesis sebagai berikut :

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (tidak terdapat perbedaan nyata nilai rerata antara data historis dan data hasil bangkitan)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (terdapat perbedaan nyata)

2. Diketahui parameter statistik data historis dan data hasil bangkitan pada bulan Januari untuk data historis 10 tahun adalah sebagai berikut (lihat lampiran 3) :

$$n_1 = 10; \bar{X}_1 = 54,800; S_1 = 18,040$$

$$n_2 = 80; \bar{X}_2 = 54.185; S_2 = 15,777$$

3. Menghitung statistik penguji berdistribusi student-t sebagai berikut :

$$\sigma = \left| \frac{n_1 \cdot S_1^2 + n_2 \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right|^{0.5} \dots \dots \dots (4.16)$$

$$\sigma = \left| \frac{10 \times 18.040^2 + 80 \times 15.777^2}{10 + 80 - 2} \right|^{0.5} = 16.226$$

$$t = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sigma \left| \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right|^{0.5}} \dots \dots \dots (4.17)$$

$$t = \frac{|54.800 - 54.185|}{16.226 \times \left| \frac{1}{10} + \frac{1}{80} \right|^{0.5}} = 0.113$$

4. Menghitung derajat kebebasan dengan rumus sebagai berikut :

$$DK = n_1 + n_2 - 2 \dots \dots \dots (4.18)$$

$$DK = 10 + 80 - 2 = 88$$

5. Dari tabel luas daerah distribusi student- t untuk derajat kebebasan $DK=88$ dengan $\alpha = 5\%$, maka diperoleh harga $t_{cr(88;0,025)} = 1,960$ (lihat Lampiran 4).

6. Harga $t = 0,113$ terletak antara $-t_{cr}$ dan t_{cr} , yaitu $-t_{cr} = -1,960 < t = 0,113 < t_{cr} = 1,960$, maka H_0 diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan nyata, nilai rerata antara data historis dan data hasil bangkitan

Contoh uji kesamaan varian bulan januari antara data historis dengan data hasil bangkitan (untuk data historis 10 tahun) adalah sebagai berikut :

1. Menentukan hipotesis sebagai berikut :

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (tidak terdapat perbedaan nyata nilai varian antara data historis dan data hasil bangkitan)

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ (terdapat perbedaan nyata)

2. Menghitung statistik penguji berdistribusi F, dengan rumus sebagai berikut :

$$F = \frac{n_1 \cdot S_1^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_2 \cdot S_2^2 \cdot (n_1 - 1)} \dots \dots \dots (4.19)$$

$$F = \frac{10 \times 18.040^2 \times (80 - 1)}{50 \times 15.777^2 \times (10 - 1)} = 1.435$$

3. Menghitung derajat kebebasan (DK) dengan rumus sebagai berikut :

$$DK_1 = n_1 - 1 \dots \dots \dots (4.20)$$

$$DK_1 = 10 - 1 = 9$$

$$DK_2 = n_2 - 1 \dots \dots \dots (4.21)$$

$$DK_2 = 80 - 1 = 79$$

4. Dari tabel luas daerah distribusi F untuk derajat kebebasan $DK_1 = 9$ dan $DK_2 = 49$ dengan $\alpha = 5 \%$, maka diperoleh harga $F_{cr (9,49;0,05)} = 2,084$ (lihat Lampiran 4).
5. Harga $F = 1,533 < F_{cr (9,49;0,05)} = 2,084$, maka H_0 diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan nyata, nilai varian antara data historis dan data hasil bangkitan

Untuk perhitungan selanjutnya disajikan dalam tabel sebagai berikut :

Tabel 4.6 Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara data debit historis dengan data hasil bangkitan 80 tahun (untuk data historis 10 tahun)

Bulan	DK	σ	t	tcr	F	Fcr	Kesimpulan
Januari	88	16.226	0.113	1.960	1.435	1.953	o.k
Pebruari	88	16.948	0.107	1.960	1.561	1.953	o.k
Maret	88	16.944	0.165	1.960	1.641	1.953	o.k
April	88	14.582	0.121	1.960	1.074	1.953	o.k
Mei	88	15.321	0.138	1.960	1.280	1.953	o.k
Juni	88	4.118	0.117	1.960	0.826	1.953	o.k
Juli	88	5.734	0.178	1.960	1.843	1.953	o.k
Agustus	88	5.984	0.214	1.960	1.842	1.953	o.k
September	88	3.624	0.091	1.960	0.409	1.953	o.k
Oktober	88	5.978	0.076	1.960	1.717	1.953	o.k
Nopember	88	17.001	0.112	1.960	1.628	1.953	o.k
Desember	88	16.528	0.127	1.960	1.477	1.953	o.k

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 4.7 Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara data debit historis dengan data hasil bangkitan 80 tahun (untuk data historis 20 tahun)

Bulan	DK	σ	t	tcr	F	Fcr	Kesimpulan
Januari	98	16.322	0.188	1.960	1.322	1.693	o.k
Pebruari	98	16.093	0.164	1.960	1.259	1.693	o.k
Maret	98	19.658	0.250	1.960	1.582	1.693	o.k
April	98	14.118	0.089	1.960	0.841	1.693	o.k
Mei	98	15.486	0.158	1.960	1.141	1.693	o.k
Juni	98	5.110	0.187	1.960	1.519	1.693	o.k
Juli	98	5.764	0.188	1.960	1.554	1.693	o.k
Agustus	98	5.507	0.230	1.960	1.462	1.693	o.k
September	98	3.958	0.145	1.960	0.659	1.693	o.k
Oktober	98	5.820	0.115	1.960	1.556	1.693	o.k
Nopember	98	15.433	0.167	1.960	1.148	1.693	o.k
Desember	98	15.610	0.153	1.960	1.191	1.693	o.k

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 4.8 Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara data debit historis dengan data hasil bangkitan 80 tahun (untuk data historis 30 tahun)

Bulan	DK	σ	t	tcr	F	Fcr	Kesimpulan
Januari	108	16.559	0.192	1.960	1.310	1.570	o.k
Pebruari	108	15.652	0.187	1.960	1.111	1.570	o.k
Maret	108	18.589	0.220	1.960	1.347	1.570	o.k
April	108	14.547	0.185	1.960	0.979	1.570	o.k
Mei	108	15.859	0.223	1.960	1.454	1.570	o.k
Juni	108	5.287	0.230	1.960	1.422	1.570	o.k
Juli	108	6.073	0.224	1.960	1.460	1.570	o.k
Agustus	108	5.288	0.246	1.960	1.322	1.570	o.k
September	108	5.189	0.195	1.960	1.449	1.570	o.k
Oktober	108	6.591	0.136	1.960	1.430	1.570	o.k
Nopember	108	14.598	0.157	1.960	1.043	1.570	o.k
Desember	108	16.006	0.179	1.960	1.189	1.570	o.k

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 4.9 Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara data debit historis dengan data hasil bangkitan 80 tahun (untuk data historis 40 tahun)

Bulan	DK	σ	t	tcr	F	Fcr	Kesimpulan
Januari	118	18.500	0.242	1.960	1.309	1.503	o.k
Pebruari	118	16.516	0.226	1.960	1.276	1.503	o.k
Maret	118	15.583	0.236	1.960	1.164	1.503	o.k
April	118	14.560	0.221	1.960	1.002	1.503	o.k
Mei	118	14.902	0.357	1.960	1.137	1.503	o.k
Juni	118	5.227	0.288	1.960	1.269	1.503	o.k
Juli	118	5.897	0.298	1.960	1.348	1.503	o.k
Agustus	118	4.870	0.334	1.960	1.193	1.503	o.k
September	118	4.855	0.225	1.960	1.287	1.503	o.k
Oktober	118	6.203	0.128	1.960	1.446	1.503	o.k
Nopember	118	14.440	0.167	1.960	0.931	1.503	o.k
Desember	118	16.488	0.231	1.960	1.315	1.503	o.k

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 4.10 Hasil uji kesamaan nilai rerata dan varian antara data debit historis dengan data hasil bangkitan 80 tahun (untuk data historis 45 tahun)

Bulan	DK	σ	t	tcr	F	Fcr	Kesimpulan
Januari	123	17.983	0.297	1.960	1.247	1.373	o.k
Pebruari	123	16.267	0.281	1.960	1.221	1.373	o.k
Maret	123	15.328	0.327	1.960	1.119	1.373	o.k
April	123	14.381	0.294	1.960	0.934	1.373	o.k
Mei	123	15.032	0.276	1.960	0.981	1.373	o.k
Juni	123	5.053	0.273	1.960	1.147	1.373	o.k
Juli	123	5.683	0.260	1.960	1.264	1.373	o.k
Agustus	123	4.728	0.262	1.960	1.209	1.373	o.k
September	123	4.882	0.200	1.960	1.190	1.373	o.k
Oktober	123	6.158	0.169	1.960	1.254	1.373	o.k
Nopember	123	14.597	0.226	1.960	0.958	1.373	o.k
Desember	123	16.449	0.282	1.960	1.190	1.373	o.k

Sumber : Hasil perhitungan

Berdasarkan tabel hasil perhitungan data hasil bangkitan (lihat Lampiran 3) dengan metode stokastik Thomas Fiering pada 3 (tiga) kelompok panjang data historis yaitu 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun 40 tahun dan 45 tahun, didapatkan data hasil bangkitan dengan nilai rerata bulanan yang hampir mendekati dengan data historisnya, untuk masing-masing kelompok panjang data. Dari tabel hasil uji kesamaan dapat disimpulkan bahwa antara data hasil bangkitan dengan data historis tidak terdapat perbedaan yang nyata atau berasal dari populasi yang sama.

4.2.3 Keandalan Waduk

Untuk menghitung keandalan waduk dipergunakan komputer, metode yang digunakan adalah metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould.

4.2.3.1 Metode Simulasi

Contoh perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi tahun pertama bulan Januari (untuk data historis 10 tahun *running* ke-1) adalah sebagai berikut :

1. Menentukan volume awal waduk (S_t), yaitu ditentukan sebesar kapasitas tampungan maksimum = 634,60 Juta m^3 .
2. Kolom *inflow* (I) adalah merupakan data debit hasil bangkitan dalam satuan m^3/dt dijadikan Juta m^3 tiap bulan, yaitu :

$$= (I \times 30 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6$$

$$= (60,24 \times 30 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6 = 156,14 \text{ Juta } m^3$$
3. Kolom kebutuhan (D) adalah merupakan data kebutuhan dalam satuan m^3/dt dijadikan Juta m^3 tiap bulan, yaitu :

$$= (D \times 30 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6$$

$$= (9,14 \times 30 \times 24 \times 60 \times 60) / 10^6 = 23,69 \text{ Juta } m^3$$
4. Kolom luas permukaan (A), dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$A = 0,3203756 (S)^{0,7566426}$$

$$= 0,3203756 \times (634,60)^{0,7566426} = 42,28 \text{ km}^2$$
5. Kolom evaporasi (E) adalah merupakan data evaporasi dalam satuan mm/hari dijadikan Juta m^3 tiap bulan, yaitu :

$$= ((E / 10^3) \times (A \times 10^6) \times 30) / 10^6$$

$$= ((3,87 / 10^3) \times (42,28 \times 10^6) \times 30) / 10^6 = 4,91 \text{ Juta } m^3$$
6. Kolom berikutnya menghitung perubahan isi tampungan waduk, dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\text{Isi tampungan} = S + I - D - E$$

$$= 634,60 + 156,14 - 23,69 - 4,91 = 762,14 \text{ Juta } m^3$$
7. Kolom selanjutnya menghitung volume akhir, yaitu sebesar isi tampungan, tetapi apabila isi tampungan melebihi dari kapasitas tampungan maksimum ($S_{\text{maks}} = 634,60 \text{ Juta } m^3$), maka volume akhir adalah sebesar kapasitas

tampungan maksimum, sedangkan apabila isi tampungan kurang dari kapasitas tampungan minimum ($S_{min} = 88,40 \text{ Juta m}^3$), maka volume akhir adalah sebesar kapasitas tampungan minimum tersebut.

Isi tampungan = $762,14 \text{ Juta m}^3$, maka volume akhir = $634,60 \text{ Juta m}^3$

8. Selanjutnya menghitung limpas dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Limpas} &= \text{Isi tampungan} - \text{Volume Akhir} \\ &= 762,14 - 634,60 \\ &= 127,54 \text{ Juta m}^3\end{aligned}$$

9. Kolom berikutnya menghitung elevasi tampungan, dalam hal ini S adalah volume akhir waduk dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}H &= [43,94691 - 5,797805 \cdot \text{LN}(S) + 0,4272123 \cdot \{\text{LN}(S)\}^2] / \\ &\quad [1 - 0,1740918 \cdot \text{LN}(S) + 0,009596045 \cdot \{\text{LN}(S)\}^2] \\ &= [43,94691 - 5,797805 \cdot \text{LN}(634,60) + 0,4272123 \cdot \{\text{LN}(634,60)\}^2] / \\ &\quad [1 - 0,1740918 \cdot \text{LN}(634,60) + 0,009596045 \cdot \{\text{LN}(634,60)\}^2] \\ &= 88,07 \text{ m}\end{aligned}$$

10. Kolom terakhir adalah kegagalan, yaitu apabila volume akhir sama dengan atau kurang dari kapasitas tampungan minimum ($S_{min} = 88,40 \text{ Juta m}^3$), maka dianggap gagal (ditulis = 1)

Karena volume akhir = $634,60$, maka kegagalan = 0

Untuk perhitungan pada bulan dan tahun berikutnya sampai dengan tahun ke-50 dapat dilihat pada lampiran 3.

Selanjutnya jumlah kegagalan adalah merupakan penjumlahan dari kegagalan secara keseluruhan dari tahun ke-1 sampai tahun ke-50., yaitu :

$$\text{Jumlah kegagalan} = 39$$

Sedangkan prosentase kegagalan dihitung dengan rumus :

$$\begin{aligned}\text{Prosentase kegagalan} &= \text{Jumlah kegagalan} / (12 \times 50) \\ &= (39 / (12 \times 50)) \times 100 \% \\ &= 6,50 \%\end{aligned}$$

Keandalan dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\text{Keandalan} &= 100 - \text{prosentase kegagalan} \\ &= 100 \% - 6,50 \% = 93,50 \%\end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan keandalan waduk dengan metode simulasi pada data historis yang lain, selanjutnya dapat dilihat pada Lampiran 3.

Hasil perhitungan keandalan waduk Kedung Ombo dengan metode simulasi adalah sebagai berikut :

- Data historis 10 tahun, data hasil bangkitan 80 tahun = 93,50 %
- Data historis 20 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 86,17 %
- Data historis 30 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 86,50 %
- Data historis 40 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 78,83 %
- Data historis 45 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 80,00 %
- Data historis 47 tahun (sebagai data *inflow*) = 80,74 %

Dengan menggunakan metode simulasi, ternyata diperoleh nilai keandalan waduk yang berbeda-beda untuk setiap panjang rangkaian data historis yang berbeda.

4.2.3.2 Metode Matriks Probabilitas Gould

Langkah / Prosedur perhitungan keandalan waduk dengan metode matriks probabilitas Gould adalah sebagai berikut :

1. Menentukan kapasitas tampungan aktif waduk (C), dengan rumus :

$$\begin{aligned}C &= S_{\text{maks.}} - S_{\text{min.}} \\ &= 634,60 - 88,40 \\ &= 546,20 \text{ Juta m}^3\end{aligned}$$

2. Merubah data debit inflow, kebutuhan dan evaporasi ke dalam satuan Juta m³ (seperti dalam metode simulasi di atas).
3. Karena koefisien variasi (Cv) = 0,19, maka menggunakan jumlah zone (z) = 10 zone. Selanjutnya menentukan volume tiap zone (W), dihitung dengan rumus :

$$\begin{aligned}W &= C / (z - 2) \\ &= 546,20 / (10 - 2) \\ &= 68,28 \text{ Juta m}^3\end{aligned}$$

4. Menyusun batas tampungan tiap zone, dengan diawali zone 0 adalah tampungan kurang dari atau sama dengan kapasitas tampungan minimum ($S_{min} = 88,40 \text{ Juta m}^3$) dan berakhir pada zone 9 adalah tampungan lebih besar dari atau sama dengan kapasitas tampungan maksimum ($S_{maks} = 634,60 \text{ Juta m}^3$).

Contoh : zone 1, dengan batas tampungan $88,40 < Z < 156,68$

5. Dengan persamaan kontinuitas, yaitu : $Z_{t+1} = Z_t + Q_t - D_t - E_t$, dihitung kondisi akhir waduk tahun ke-1 sampai dengan tahun ke-50 setiap zone. Selanjutnya hasil kondisi akhir tersebut, disusun sesuai dengan batasan tampungan tiap zone.

Contoh perhitungan pada awal tahun ke-1 bulan Januari pada zone 0, yaitu :

$$\begin{aligned} Z_{t+1} &= Z_t + Q_t - D_t - E_t \\ Z_{\text{januari}} &= 88,40 + 156,14 - 23,69 - 4,91 \\ &= 215,94 \text{ Juta m}^3 \text{ (zone 2)} \end{aligned}$$

6. Disusun juga matriks kegagalan, yaitu menunjukkan jumlah tiap-tiap kondisi volume akhir sebesar kurang dari atau sama dengan kapasitas tampungan minimum ($S_{min} = 88,40 \text{ Juta m}^3$) untuk masing-masing zone.

Contoh matriks kegagalan pada kolom 0 dan baris 0 adalah = 398

7. Disusun matriks probabilitas matriks kegagalan, yaitu dengan membagi matriks kegagalan tiap baris dan kolom yang sama, dengan (12×50) bulan.

$$\begin{aligned} \text{Contoh matriks probabilitas kegagalan pada kolom 0 dan baris 0 adalah :} \\ &= 398 / (12 \times 50) \\ &= 0,663 \end{aligned}$$

8. Selanjutnya disusun matriks transisi, yaitu menunjukkan jumlah dari tiap-tiap zone (menurut batasan zone) yang sama disesuaikan dengan baris dan kolom pada matriks.

Contoh matriks transisi pada kolom 0 dan baris 1 adalah = 98

9. Disusun matriks transisi yang menunjukkan probabilitas, yaitu dengan membagi matriks transisi tiap baris dan kolom yang sama, dengan (12×50) bulan.

Contoh pada kolom 0 dan baris 1 adalah :

$$= 98 / (12 \times 50)$$

$$= 0,163$$

10. Selanjutnya disusun matriks kondisi tetap, dengan cara memangkatkan matriks transisi hingga beberapa kali sampai diperoleh matriks dengan kolom-kolom yang bernilai sama dalam satu barisnya, yang disebut sebagai matriks kondisi tetap (*steady state*).

11. Matriks keadaan tetap (*steady state*) diambil satu kolom.

Contoh matriks *steady state* diambil satu kolom, sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} 0,1385 \\ 0,1186 \\ 0,1325 \\ 0,1166 \\ 0,1086 \\ 0,0989 \\ 0,0907 \\ 0,0839 \\ 0,0727 \\ 0,0389 \end{bmatrix}$$

12. Tingkat kegagalan waduk, dihitung dengan cara mengalikan matriks *steady state* dengan matriks probabilitas kegagalan kemudian dijumlahkan.

Matriks Steady state		Matriks Kegagalan	Matriks Kegagalan tiap zone
$\begin{bmatrix} 0,1385 \\ 0,1186 \\ 0,1325 \\ 0,1166 \\ 0,1086 \\ 0,0989 \\ 0,0907 \\ 0,0839 \\ 0,0727 \\ 0,0389 \end{bmatrix}$	x	$\begin{bmatrix} 0,6633 \\ 0,3150 \\ 0,0700 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0919 \\ 0,0374 \\ 0,0093 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \\ 0,0000 \end{bmatrix}$

$$\begin{aligned} \text{Tingkat Kegagalan} &= 0,0919 + 0,0374 + 0,0093 + 0,0000 + 0,0000 + \\ &\quad + 0,0000 + 0,0000 + 0,0000 + 0,0000 + 0,0000 \\ &= 0,1385 \% \end{aligned}$$

13. Tingkat keandalan waduk, dihitung dengan cara 100 % dikurangi tingkat kegagalan.

$$\text{Tingkat Keandalan} = 100 \% - 0,1385 \% = 99,8615 \%$$

Untuk hasil perhitungan keandalan waduk dengan metode matriks probabilitas Gould pada data historis yang lain, dapat dilihat pada Lampiran 3.

Hasil perhitungan keandalan waduk Kedung Ombo dengan metode matriks probabilitas Gould adalah sebagai berikut :

- Data historis 10 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 99,8615 %
- Data historis 20 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 99,7782 %
- Data historis 30 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 99,7925 %
- Data historis 40 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 99,6750 %
- Data historis 45 tahun, data hasil bangkitan 50 tahun = 99,7058 %
- Untuk data historis 47 tahun (sebagai data *inflow*) = 99,7422 %

Dengan menggunakan metode matriks probabilitas Gould, ternyata diperoleh nilai keandalan waduk yang tidak jauh berbeda pada setiap panjang rangkaian data historis yang berbeda.

Rekapitulasi hasil perhitungan nilai keandalan waduk Kedung Ombo dengan metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould waduk Kedung Ombo adalah sebagai berikut :

Tabel 4.11 Rekapitulasi hasil perhitungan keandalan waduk Kedung Ombo

Data Historis	Data Hasil Bangkitan	Metode Simulasi	Metode Matriks Probabilitas Gould	% Perbedaan
10 tahun	50 tahun	93,50 %	99,8615 %	6,37 %
20 tahun	50 tahun	86,17 %	99,7782 %	13,64 %
30 tahun	50 tahun	86,50 %	99,7925 %	13,32 %
40 tahun	50 tahun	78,83 %	99,6750 %	20,91 %
45 tahun	50 tahun	80,00 %	99,7058 %	19,76 %
47 tahun	-	80,74 %	99,7422 %	19,05 %

Sumber : Hasil Perhitungan

Dalam perhitungan keandalan waduk untuk setiap kelompok panjang data historis yang berbeda, dengan metode simulasi diperoleh nilai keandalan yang berbeda, sedangkan dengan metode matriks probabilitas Gould diperoleh nilai keandalan yang tidak jauh berbeda.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

1.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi yang dilakukan pada waduk Kedung Ombo, dengan asumsi dan pembatasan-pembatasan yang telah dikemukakan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk panjang data debit historis yang berbeda yaitu : 10 tahun, 20 tahun, 30 tahun, 40 tahun dan 45 tahun (yang dibangkitkan selama 50 tahun) serta data debit historis 47 tahun (yang dipakai langsung sebagai data *inflow*), dalam perhitungan keandalan waduk diperoleh hasil nilai keandalan yang berbeda-beda pada setiap kelompok panjang data historis tersebut.
2. Hasil perhitungan keandalan waduk antara metode simulasi dan metode matriks probabilitas Gould ternyata diperoleh nilai keandalan yang berbeda.

1.2 Saran

Saran yang perlu disampaikan adalah sebagai berikut :

- Untuk kepentingan praktis dalam studi lebih lanjut, maka perlu ditinjau pengaruh beberapa aspek yang lain terhadap keandalan waduk, seperti pola operasi, manajemen air irigasi, efisiensi irigasi dan sebagainya, sehingga hasilnya dapat dipergunakan sebagai masukan untuk operasi waduk.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1986, “ *Standar Perencanaan Irigasi – Kriteria Perencanaan Bagian Jaringan Irigasi (KP-01)* ” Anonim, 1999, “ *Kamus Besar Bahasa Indonesia* “, Edisi Kedua, Cetakan ke-sepuluh, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Balai Pustaka, Jakarta.
- Anonim, 1995, “ *Laporan Akhir – Pekerjaan Studi Sistem Operasi Waduk Kedung Ombo dan Manual Pengoperasian* “, Indra Karya, PT., Consulting Engineers, Semarang.
- Anonim, 2000, “ Hasil Pemantauan Data Klimatologi dan Debit Sungai Tahun 1994 – 1998 di Sub SWS Serang, Lusi, Juana “, *Laporan Hasil Pemantauan*, PPKSA Jratunseluna, Semarang.
- Anonim, 1997, “ *Irigasi dan Bangunan Air* “, Gunadarma, Jakarta
- Clarke, R.T., 1973, “ *Mathematical Models in Hydrology* “, F.A.O., Rome
- Gottfried, B.S., 1998 “ *Spreadsheet Tools for Engineers – Excel 97 Version* “, WCB Mc Graw-Hill, New York.
- Haan, C.T., 1979, “ *Statistical Methods in Hydrology* “, The IOWA University Press, Ames, IOWA
- Hadihardaja, J., 1990, “Sungai Sebagai Sumber Daya Air Berkaitan Dengan Pembangunan Nasional Memasuki Abad XXI “, *Pidato pengukuhan Guru Besar Tetap pada Fakultas Teknik Jurusan Sipil*, Undip, Semarang.
- Hoff, J.C., 1983, “ *A Practical Guide to Box Jenkins Forecasting* “, Walsworth Inc., USA.
- Imam Subarkah, 1980, “ *Hidrologi untuk Perencanaan Bangunan Air* “, Penerbit Idea Dharma, Bandung.
- Jogiyanto H.M., 1995, “ *Teori dan Aplikasi Program Komputer Bahasa Fortran* “, Penerbit Andi Offset, Yogyakarta.
- Linsley J.R., R.K., Kohler, M.A., Phaulus, J.L., 1986, “ *Hidrologi untuk Insinyur* “, Edisi ketiga, Erlangga, Jakarta.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., dan Haith, D.A., 1981, “ *Water Resources System Planning and Analysis* “, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

- Mc Mahon, T.A. dan Mein, R.G., 1978, "*Reservoir and Capacity and Yield*", Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Miller, A.R., 1981, "*Pascal Programs For Scientists*", Sybec Inc., United States of America
- Morel, H.J., Seytoux, 1978, "*Engineering Hydrology (Forecasting of Flows-Flood Frequency Analysis)*", State University Fort Collins, Colorado.
- Pantouw, J.P., 1988, "Optimasi Potensi Air DAS sebagai Satu Sistem dengan Program Linier", *Tesis S-2*, Fakultas Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta
- Pranoto, S., 1994, "Kombinasi Analisa Program Linier dan Simulasi untuk Optimasi Pemanfaatan Air Daerah Aliran Sungai, *Makalah Seminar Kelompok Hidro Jurusan Sipil*, Fakultas Teknik, Undip, Semarang.
- Pranoto, S., 1994, "Optimasi Pemanfaatan Air DAS Serayu (waduk Mrica) dengan Menggunakan Program Linier dan Simulasi, *Tesis Magister Teknik Sumber Daya Air*, Fakultas Teknik, ITB, Bandung.
- Raudkivi, A.J., 1979, "*Hydrology, An Advanced Introduction to Hydrological Processes and Modelling*", Pergamon Press, Sidney.
- Reddy, P.J., 1987, "*Stochastic Hydrology*", Laxmi Publications, New Delhi, Madras, Jalandhar.
- Salas, J.D., Delleur, J.W., Yevjevich, V and Lane, W.L., 1980, "*Applied Modelling of Hydrologic Time Series*", Water Resources Publication, Littleton.
- Seyhan, E., 1993, "*Dasar-dasar Hidrologi*", terjemahan dari Sentot S., Gadjah Mada University Press, Yogyakarta
- Soemarto, B.I.E., 1986, "*Hidrologi Teknik*", Penerbit Usaha Nasional, Surabaya.
- Soewarno, 1995, "*Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*", Jilid 1, Penerbit Nova, Bandung.
- Soewarno, 1995, "*Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*", Jilid 2, Penerbit Nova, Bandung.
- Sosrodarsono, S. dan Takeda, K., 1987, "*Hidrologi untuk Pengairan*", PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

- Sri Eko Wahyuni, 1990, “ Analisis Stokastik Hujan dan Model Simulasi Hidrologi untuk Pembangkit Data Debit Bulanan “, *Tesis Magister Teknik Sumber Daya Air*, Fakultas Teknik, ITB, Bandung.
- Sri Eko Wahyuni, 1998, “ Pembangkitan Data dengan Model Stokastik AR “, *Makalah Seminar Kelompok Sipil Hidro Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik*, Undip, Semarang.
- Sri Eko Wahyuni, 1998, “ Hidrologi Lanjut “, *Diktat Kuliah Magister Teknik Sipil*, Undip, Semarang.
- Sudibyono, A.H., 1994, “ *Clipper* “, Andi Offset, Yogyakarta.
- Sudjarwadi, 1987, “ *Dasar-dasar Teknik Irigasi* “, KMTS UGM, Yogyakarta.
- Sudjarwadi, 1988, “ *Teknik Sumber Daya Air* “, PAU Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Sudjarwadi, 1989, “ *Operasi Waduk* “, PAU Ilmu Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suharyanto, 1997, “ Analisis Unjuk Kerja Pengoperasian waduk “, *Media Komunikasi Teknik Sipil*, Edisi VIII, Undip, Semarang.
- Supranto, J. 1996, “ *Teori dan Aplikasi Statistik* “. Jilid 2, Penerbit Erlangga, Ciracas, Jakarta.
- Tarigan, A., 2001, “ Optimasi Pemanfaatan Air Waduk Kedung Ombo dengan Program Linier “, *Tesis Magister Teknik Sipil*, Undip, Semarang.
- Wiratman dan Associates, 2000, “ Perencanaan Pengembangan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Jratunseluna, *Laporan Akhir*, Semarang.
- Wurbs, R.A., 1996, “ *Modelling and Analysis of Reservoir System Operations* “, Prentice Hall PTR.
- Zanzawi, S., 1986, “ *Metode Statistika I dan II* “, Penerbit Karunika Jakarta.